

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Stanovení stabilizačního tlaku na čelbu raženého tunelu s využitím
analytických výpočetních metod

Determination of Stabilization Pressure at the Excavation Tunnel Face
by Using Analytical Calculation Methods

Student:

Adam Melichar

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student:

Adam Melichar

Studijní program:

B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor:

3647R017 Geotechnika

Téma:

Stanovení stabilizačního tlaku na čelbu raženého tunelu s využitím
analytických výpočetních metod
Determination of Stabilization Pressure at the Excavation Tunnel Face
by Using Analytical Calculation Methods

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. Přehled analytických metod pro stanovení stabilizačního tlaku na čelbu a jejich principy (upper bound theory, lower bound theory)
3. Sestavení kalkulátorů pro výpočet stabilizačního tlaku na čelbu v prostředí Excel
4. Variantní parametrické výpočty pro stanovení stabilizačního tlaku pro různé určující faktory
5. Vyhodnocení výsledků variantních výpočtů
6. Formulace doporučení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Kolymbas, D. *Tunnelling and Tunnel Mechanics*. Springer, 2005. ISBN-10: 3-540-25196-0.
2. Klepsatel, Kusý. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Bratislava : JAGA, 2003. ISBN 80-77905-43-5.
3. Javad Mohammadi, Kourosh Shahriar, Parviz Moarefvand. Tunnel Face Stability Analysis in Soft Ground in Urban Tunneling by EPB Shield. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(11): 589-601, 2011. ISSN 1991-8178. Dostupné z: <http://connection.ebscohost.com/c/articles/69909806/tunnel-face-stability-analysis-soft-ground-urban-tunneling-by-epb-shield-case-study-7th-line-tehran-metro>.
4. Lea, E., Domieux, L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material. *Geotechnique* 40, 1990. No. 4. Dostupné z: <http://eurekamag.com/pdf/018/018368998.pdf>
5. Broere, W. *Tunnel Face Stability and New CPT Applications*. Delft University Press 2001. ISBN 90-407-2215-3. Dostupné z: http://geo.citg.tudelft.nl/broere/pdf/broere_phdthesis.pdf.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

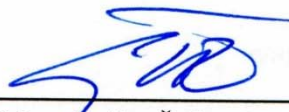
Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.**

Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 02.05.2016



doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 29.4.2016

..... Melichar

podpis studenta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 19.4. 2016

Anotace

Při ražbě tunelu pomocí mechanizovaných plnoprofilových razících strojů, musíme zaručit bezpečnost. Je důležité stanovit stabilizační tlak, aby byla zajištěna stabilita na čelbě tunelu. Pomocí analytických metod je možné tento problém řešit rychle a s dostatečnou přesností jako u zdlouhavého modelování pomocí počítačového softwaru. Analytické metody se dělí na dvě skupiny, metody mezní rovnováhy a metody limitní analýzy. Metody stanovují minimální stabilizační tlak pro pohyb směrem do čelby a maximální stabilizační tlak pro takzvané vystrčení, respektive vytlačení zeminy směrem na povrch. Analytické metody jsou určeny pro soudržné zeminy i pro nesoudržné zeminy. Většina těchto metod je určena pro homogenní prostředí. V této práci jsou uvedené výsledky variantních výpočtu podle vstupních dat a jejich rozsahu. Srovnání metod v soudržných zeminách, podle vstupních parametrů daných metod a to samé bylo provedeno i pro nesoudržné zeminy. Dále výpočet podle parametrů převzatých z ČSN 73 1001 pro jemnozrnné zeminy. Sestavní Makro výpočtu v prostředí Excel pro usnadnění výpočtů.

Klíčová slova: stabilita, čelba tunelu, analytické, rovnováhy, limitní

Annotation

To excavate the tunnel using mechanized Full-Face Tunneling Machines, we need to ensure security. It is important to establish a stabilizing pressure to ensure stability at the tunnel face. Using analytical methods the problem can be dealt with quickly and with sufficient accuracy as in the lengthy modeling using computer software. Analytical methods are divided into two groups, methods limit equilibrium and limit analysis methods. Methods for setting minimum stabilizing pressure to move toward the face and stabilizing the maximum pressure for the so-called thrust forward, pushing soil or toward the surface. Analytical methods are for cohesive soils for non-cohesive soils. Most of these methods are designed for a homogenous environment. In this work we are given the results of alternative calculation according to input data and their scope. Comparison of methods in cohesive soils, according to the input parameters of the methods and the same was done for non-cohesive soils. Further calculation parameters assumed by ČSN 73 1001 for fine-grained soils. Builds the Macro calculation in Excel environment to facilitate the calculations.

Key Words: Stability, Face Tunnel, Analytical, Equilibrium, Limit

Obsah

Seznam použitého značení	8
1. Úvod do problematiky	10
2. Přehled analytických metod pro stanovení stabilizačního tlaku na čelbu a jejich principy.....	11
2.1. Metody mezní rovnováhy.....	13
2.2. Metody limitní analýzy - Upper and Lower bound theory.....	19
3. Sestavení kalkulátorů pro výpočet stabilizačního tlaku na čelbu v prostředí Excel	33
3.1. Analytická část	33
3.2. Vlastnosti zemin dle směrných normových charakteristik dle ČSN 73 1001	33
3.3. Makro	33
4. Variantní parametrické výpočty pro stanovení stabilizačního tlaku pro různé faktory	35
4.1. Soudržné zeminy	35
4.2. Nesoudržné zeminy	57
5. Vyhodnocení výsledků variantních výpočtů.....	77
5.1. Soudržné zeminy	77
5.2. Nesoudržné zeminy	79
5.3. Srovnání metod v soudržných zeminách.....	80
5.4. Srovnání metod v nesoudržných zeminách.....	82
5.5. Vlastnosti zemin dle směrných normových charakteristik dle ČSN 73 1001	84
6. Formulace doporučení a závěr	86
Seznam obrázků	88
Seznam tabulek	89
Seznam grafů.....	92
Seznam příloh.....	95
Literatura	96
Přílohy	97

Seznam použitého značení

Latinská abeceda

Značka	Popis	Jednotka
B	Šířka klínu	$[m]$
C	Výška nadloží	$[m]$
c	Soudržnost zeminy	$[kPa]$
c^{cr}	Kritická soudržnost zeminy	$[kPa]$
c_u	Neodvozená smyková soudržnost	$[kPa]$
D	Průměr tunelu	$[m]$
E	Síla, kterou působí zemina	$[kN]$
FS	Faktor bezpečnosti	$[-]$
G_s	Síla vyvolaná hmotností klenby	$[kN]$
G_w	Síla vyvolaná hmotností klínu	$[kN]$
H	Výška nadloží ke středu tunelu / Jancsecz & Steiner – Výška HPV od dna tunelu	$[m]$
K	Jancsecz & Steiner – Normálová síla / Carranza-Torrese – Parametr tvaru	$[kN] /$ $[-]$
K_{A3}	3D součinitel aktivního tlaku	$[-]$
K_a	Součinitel aktivního tlaku	$[-]$
K_p	Součinitel pasivního tlaku	$[-]$
N_s, N_γ	Bezrozměrné faktory	$[-]$
N_φ^{FS}	Poměr faktoru bezpečnosti a úhlu vnitřního tření	$[-]$
P	Vzdálenost mezi čelbou a nevyztuženou částí tunelu	$[m]$
p	Stabilizační tlak	$[kPa]$
p_{max}	Maximální stabilizační tlak	$[kPa]$
p_{min}	Minimální stabilizační tlak	$[kPa]$
Q_s, Q_t, Q_γ	Parametry zatížení	$[-]$
q_s	Přetížení na povrchu	$[kPa]$
R	Poloměr tunelu	$[m]$
R_A, R_B, R_C, R_D, R_E	Geometrické faktory	$[-]$
T	Smyková síla	$[kN]$

Řecká abeceda

Značka	Popis	Jednotka
α	Pomocný úhel	[°]
β	Úhel skluzu klínu	[°]
γ	Objemová tíha zeminy	$[kNm^{-3}]$
γ_d	Objemová tíha suché zeminy	$[kNm^{-3}]$
γ_{su}	Objemová tíha zeminy pod HPV	$[kNm^{-3}]$
σ_t	Podpůrný tlak	$[kPa]$
σ_{uc}	Prostá pevnost v tahu	$[kPa]$
σ'_v	Terzaghiho řešení pro suchou zeminu	$[kPa]$
$\bar{\sigma}'_v$	Terzaghiho řešení pro saturovanou zeminu	$[kPa]$
σ'_{vd}	Svislí tlak suché zeminy	$[kPa]$
φ	Úhel vnitřního tření zeminy	[°]
φ^{cr}	Kritický úhel vnitřního tření zeminy	[°]

1. Úvod do problematiky

Ražení pomocí plnoprofilivých razících strojů je technicky náročný proces. Důležitou součástí je při tomto procesu zajistit bezpečnost po celou dobu výstavby raženého díla „tunelu“. V této práci se zaměříme na bezpečné stanovení stabilizačního tlaku na čelbu raženého tunelu pomocí analytických metod. Bezpečným stanovením stabilizačního tlaku na čelbu raženého tunelu se snažíme minimalizovat sedání zeminy na povrchu nebo zabránit úplnému selhání čelby při výstavbě. U špatně stanoveného stabilizačního tlaku může dojít ke zpomalení výstavby celého díla, nebo ke zhrocení čelby díla a to vede k poruše nebo k úplnému zničení razícího stroje.

Analytické metody se liší matematickou a geometrickou podstatou a vstupními parametry. Metody jsou omezeny vstupními daty oproti modelování v počítačovém softwaru. Časová náročnost jednotlivých analytických metod se liší. Z praktického ohledu se dají tyto metody zautomatizovat z hlediska potřebného času na výpočet pomocí tabulkových výpočetních programu (Excel, Makro – Visual Basic).

Analytické metody používané pro stanovení stabilizačního tlaku lze rozdělit na dvě skupiny, metody mezní rovnováhy a metody limitní analýzy. Metody mezní rovnováhy nezahrnují vliv přetvárných parametrů prostředí. Metody mezní analýzy se dělí na dvě řešení upper bound a lower bound. Řešení upper bound dovoluje vzniku deformací v podobě mechanismu selhání kuželového tvaru. Lze napsat, že řešení podle upper bound je kinematické řešení této úlohy. Řešení lower bound nedovoluje vznik deformací (selhání v podobě kužele nebo jiného). Lze napsat, že řešení podle lower bound je staticky přijatelné řešení. V kapitole 2. *Přehled analytických metod pro stanovení stabilizačního tlaku na čelbu raženého tunelu a její princip* v tabulce 2.1 je uveden přehled základních analytických metod, jejich principy a vypočtení vzorce. Podrobnější informace, vztahy, obrázky modelu čelby jsou vypracované pro metody použité k parametrickým výpočtům a dalším výpočtům. Podrobnější zaměření na metody Broms & Bennermark, Krause (porušení ve tvaru půlkruh, čtvrtkruh a polokoule), Jancsecz & Steiner, Atkinson & Potts (lower a upper bound), Davis a spol., Leca & Dormieux a Carranza-Torrese.

2. Přehled analytických metod pro stanovení stabilizačního tlaku na čelbu a jejich principy

Tabulka 2.1 uvádí přehled analytických metod pro výpočet stabilizačního tlaku čelby raženého tunelu. U vybraných metod jsou zobrazeny principy a vzorce pro stanovení stabilizačního tlaku čelby. Dále zde je uvedeno jaké vstupní parametry jsou v metodě uvažované (soudržnost c a úhel vnitřního tření zeminy φ). Označení (+) znamená, že do metody vstupuje daný parametr a označení (-) znamená, že do metody nevstupuje daný parametr.

Tabulka 2.1.: Přehled analytických metod pro stanovení stabilizačního tlaku na čelbu a jejich principy [2]

Rok	Autor	Podmínky		Princip	Vzorec
		c	φ		
1961	Horn	+	+	Metoda mezní rovnováhy	-
1966	Murayama	+	+	Empirická metoda	Viz. [2]
1967	Broms & Bennermark	-	+	Metoda mezní rovnováhy	$p = \gamma * (C + R) + q_s - N * c_u$
1977	Atkinson & Potts	-	+	Lower bound	$p = \frac{2 * K_p}{K_p^2 - 1} * \gamma * R$
				Upper bound	$p = \frac{\gamma * D}{4 * \cos(\varphi)} * \left(\frac{1}{\tan(\varphi)} + \varphi - \frac{\pi}{2} \right)$
1980	Davis a spol.	+	-	Upper bound	$p = \gamma * (C + R) - c_u * N + q_s$
1987	Krause	+	+	Metoda mezní rovnováhy	Porušení ve tvaru půlkruhu $p = \frac{1}{\tan(\varphi)} * \left(\frac{1}{6} * D * \gamma - \frac{1}{2} * \pi * c \right)$
					Porušení ve tvaru čtvrtkruhu $p = \frac{1}{\tan(\varphi)} * \left(\frac{1}{3} * D * \gamma - \frac{1}{2} * \pi * c \right)$
					Porušení ve tvaru polokoule $p = \frac{1}{\tan(\varphi)} * \left(\frac{1}{9} * D * \gamma - \frac{1}{2} * \pi * c \right)$
1988	Mohkama	+	+	Integrační metoda	Viz. [2]

1990	Leca & Dormieux	+	+	Upper bound	Pro $c = 0 \text{ kPa}$ $p = N_s * q_s + N_\gamma * \gamma * D$
					Pro $c > 0 \text{ kPa}$ $p = \frac{Q_t - 1}{k_p - 1} * \sigma_{uc}$
1991	Mori	+	-	Empirická metoda	-
1994	Jancsecz & Steiner	+	+	Metoda mezní rovnováhy	$p = \frac{4 * E}{\pi * (R * 2)^2}$
1994	Anagnostou & Kovári	+	+	Metoda mezní rovnováhy, zohledňuje infiltraci	Viz. [4]
1999	Belter a spol.	+	+	Metoda mezní rovnováhy, zohlednění vrstevnatého prostředí	-
2001	Vermeer & Ruse	+	+	Rovnice stanovená na základě numerického modelu metodu konečných prvků (Plaxis)	$p = -\frac{c}{\tan(\varphi)} + 2 * \gamma * R * \left(\frac{1}{9 * \tan(\varphi)} - 0,05 \right)$
2001	Broere	+	+	Metoda mezní rovnováhy, zohlednění vrstevnatého prostředí	Viz. [2] a [4]
2004	Carranza-Torrese	+	+	Metoda mezní rovnováhy, zohledňující parametr bezpečnosti	$\frac{p}{\gamma * R} = \left[\frac{q_s}{\gamma * R} + \frac{c}{\gamma * R} * \frac{1}{\tan(\varphi)} \right] * \left[\frac{h}{r} \right]^{-K(N_\phi^{FS}-1)} - \frac{1}{K(N_\phi^{FS}-1)-1} * \left[\left(\frac{h}{R} \right)^{1-K(N_\phi^{FS}-1)} \right] - \frac{c}{\gamma * R} * \frac{1}{\tan(\varphi)}$

2.1. Metody mezní rovnováhy

Metoda Broms & Bennermark – 1967

Popisuje stanovení stabilizačního tlaku na čelbu pro soudržné zeminy (jíly) u svislého kruhového otvoru. Řada modelových zkoušek stanovila empirické vzorce pro výpočet, kdy došlo ke zhroucení čelby tunelu.

Do vzorce pro model je zohledněna poměrná stabilita N . Poměrná stabilita pro $N < 6$ v metodě zajišťuje stabilitu, kolaps nastane v případě, že poměrná stabilita je vyšší než $6 * c_u$ respektive $N > 6$. Hodnoty faktoru poměrné stability N , odpovídajícím stavům deformace půdy jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2.: *Broms & Bennermark* - Popis deformací půdy k poměrné stabilitě N [1]

N	Deformace půdy
< 1	Zanedbatelné
1 – 2	Pružné
2 – 4	Pružně-plastické
4 – 6	Plastické
> 6	Zhrocení (kolaps)

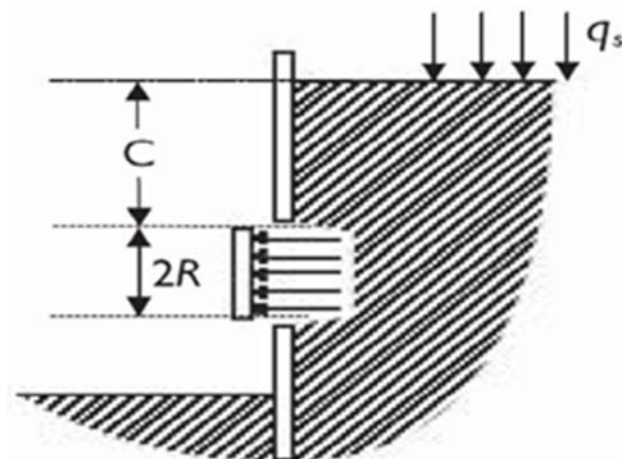
Poměrnou stabilitu N lze vypočítat jako podíl rozdílu mezi celkovým tlakem nadloží a stabilizačním tlakem a podílem neodvodněné smykové pevnosti (jílových zemin). Vzorec 2.1 pro výpočet poměrné stability [4]:

$$N = \frac{q_s - p}{c_u} + \frac{\gamma}{c_u} * (C + R). \quad (2.1.)$$

Stanovení minimálního stabilizačního tlaku, je počítáno podle následující rovnice 2.2 [4].:

$$p_{min} = \gamma * (C + R) + q_s - N * c_u. \quad (2.2.)$$

Aby se mohlo uvažovat o minimálním stabilizačním tlaku na čelbu tunelu, musí se $N = 6$, při kterém dojde k plastické deformaci půdy.

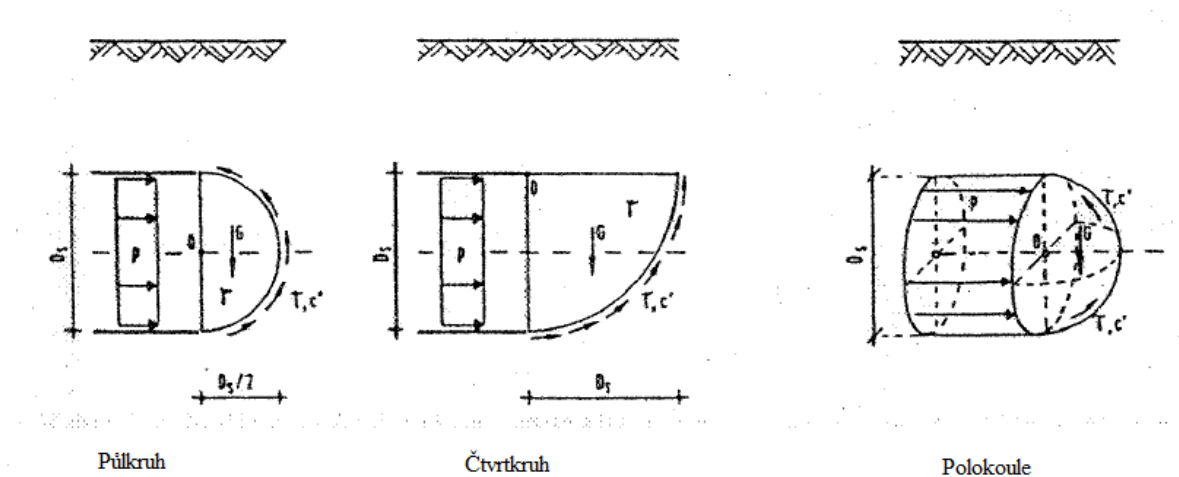


Obrázek 2.1.: *Broms & Bennermark - Model stability čelby* [4]

Teorie vychází z experimentu pro $C/D > 4$. Změnou poměrné stability N v rozmezí 0 až 6, je možné vypočítat lower a upper bound hodnoty minimálního stabilizačního tlaku. Poměrná stabilita $N = 0$ je pro určení řešení lower bound. Poměrnou stabilitou $N = 6$ je pro určení řešení upper bound. Neodvodněná smyková pevnost je rozhodující pro tuto metodu. Metoda se používá pouze pro homogenní zeminy.

Metoda Krause – 1987

Metoda popisuje tři typy vnitřní rovnováhy zeminy před čelbou tunelu. Jedná se o metodu mezní rovnováhy, která užívá smykových napětí na kluzných rovinách. Mechanismy selhání pro stanovení stabilizačního tlaku na čelbu tunelu jsou půlkruh, čtvrtkruh a polokoule zobrazeny na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2.: Krause - Model stability čelby [1]

Výpočet stabilizačního tlaku pro tyto tvary, předpokládáme rovnovážné mechanismy selhání, jsou vyjádřené pro jednotlivé tvary vzorec 2.3 půlkruh, 2.4 čtvrtekruh a 2.5 polokoule [4]:

$$p_{min} = \frac{1}{\tan(\varphi)} * \left(\frac{1}{6} * D * \gamma - \frac{1}{2} * \pi * c \right), \quad (2.3.)$$

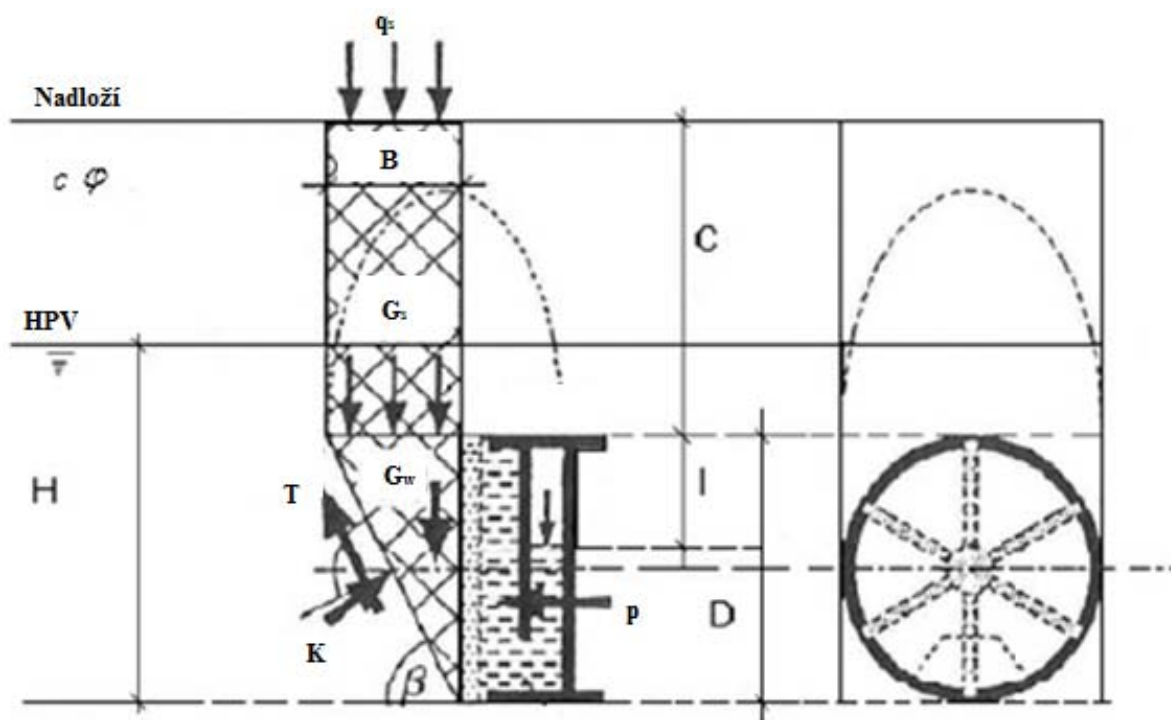
$$p_{min} = \frac{1}{\tan(\varphi)} * \left(\frac{1}{3} * D * \gamma - \frac{1}{2} * \pi * c \right), \quad (2.4.)$$

$$p_{min} = \frac{1}{\tan(\varphi)} * \left(\frac{1}{9} * D * \gamma - \frac{1}{2} * \pi * c \right). \quad (2.5.)$$

Celkový stabilizační tlak je součet maximálního efektivního tlaku a pórového tlaku. Výpočet je nezávislý na výšce nadloží. Nejvyššího minimálního stabilizačního tlaku dosahuje tvar čtvrtekruhu.

Metoda Jancsecz & Steiner – 1994

Metoda bere v úvahu síly působící na možné a pravděpodobné selhání mechanismu s využitím metody mezní rovnováhy pro určení mezního zemního tlaku působícího na čelbu tunelu.



Obrázek 2.3.: Janiczek & Steiner - Model stability čelby [4]

Metoda je složena ze dvou částí:

- Klín v čelbě tunelu (lower část)
- Klenba nad klínem (upper část)

Výpočet minimálního stabilizačního tlaku pomocí vzorce 2.6 [4]:

$$p_{min} = \frac{4 * E}{\pi * (R * 2)^2}. \quad (2.6.)$$

Síla, kterou působí zemina E se vypočítá podle vzorce 2.7 [4]:

$$E = - \frac{(\cos(\beta) * \tan(\varphi) - \sin(\beta)) * (G_s + G_w) + (2T + K)}{\sin(\beta) * \tan(\varphi) + \cos(\beta)}. \quad (2.7.)$$

Síla vyvolaná hmotností klenby G_s se vypočte pomocí vzorce 2.8 [4] a síla vyvolaná hmotností vzniklého klínu G_w se vypočte pomocí vzorce 2.9 [4]:

$$G_s = B * 2 * R * \cot(\beta) * \sigma'_v, \quad (2.8.)$$

$$G_w = \frac{B * (2 * R)^2 * \gamma_{su} * \cot(\beta)}{2}. \quad (2.9.)$$

Smyková síla T působící na šikmou rovinu klínu, vypočteme pomocí vzorce 2.10 [4]:

$$T = \frac{(2 * R)^2 * \cot(\beta)}{2} * (c + K_{A3} * \bar{\sigma}'_v * \tan(\varphi)). \quad (2.10.)$$

Normálová síla K působící na klín se vypočte v následujícím vzorci 2.11 [4]:

$$K = \frac{B * 2 * R * c}{\sin(\beta)}. \quad (2.11.)$$

Terzaghiho řešení pro suchou zeminu vzorec 2.12 [4] a řešení pro saturovanou zeminu vzorec 2.13 [3]:

$$\sigma'_v = \frac{\left(\frac{B}{2}\right) * \gamma_d - c}{K_a * \tan(\varphi)} * \left[1 - e^{-\frac{C * K_a * \tan(\varphi)}{\left(\frac{B}{2}\right)}} \right] + q_s * e^{-\frac{C * K_a * \tan(\varphi)}{\left(\frac{B}{2}\right)}}, \quad (2.12.)$$

$$\bar{\sigma}'_v = \frac{\left(\frac{B}{2}\right) * \gamma_{su} - c}{K_a * \tan(\varphi)} * \left[1 - e^{-\frac{H * K_a * \tan(\varphi)}{\left(\frac{B}{2}\right)}} \right] + \sigma'_{vd} * e^{-\frac{H * K_a * \tan(\varphi)}{\left(\frac{B}{2}\right)}}, \quad (2.13.)$$

Svislý tlak suché zeminy σ'_{vd} vzorce 2.14 [3]:

$$\sigma'_{vd} = \frac{\left(\frac{B}{2}\right) * \gamma_d - c}{K_a * \tan(\varphi)} * \left[1 - e^{-\frac{C-H}{\left(\frac{B}{2}\right)} * K_a * \tan(\varphi)} \right] + q_s * e^{-\frac{C-H}{\left(\frac{B}{2}\right)} * K_a * \tan(\varphi)}. \quad (2.14.)$$

Hodnoty úhlu skluzu β lze dostat pomocí interpolace z tabulky 2.3, kde jsou uvedeny základní úhly vnitřního tření ($\varphi = 20^\circ \sim 40^\circ$) a poměr $C/D = 0 \sim 3 \text{ m}$.

Tabulka 2.3.: Jancsecz & Steiner - Interpolační tabulka pro zjištění β [1]

$\frac{C}{D}$	β				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
0	60,340	62,611	64,802	66,9	68,918
1	61,890	64,161	66,286	68,283	70,177
2	62,197	64,464	66,58	68,566	70,423
3	62,322	64,592	66,706	68,683	70,527

Koeficient zemního tlaku K_{A3} se dostane pomocí interpolace. Hodnoty pro interpolace určených pomocí základních úhlů vnitřního tření ($\varphi = 20^\circ - 40^\circ$) a poměr $C/D = 0 - 3 \text{ m}$ jsou uvedeny v tabulce 2.4 nebo je lze vypočítat pomocí vzorce 2.15 [1]:

Tabulka 2.4.: Jancsecz & Steiner - Interpoláční tabulka pro koeficient zemního tlaku K_{A3} [1]

$\frac{C}{D}$	K_{A3}				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
0	0,386	0,31	0,248	0,199	0,159
1	0,354	0,279	0,222	0,177	0,141
2	0,348	0,273	0,217	0,173	0,138
3	0,345	0,271	0,214	0,171	0,136

$$K_{A3} = \frac{\sin(\beta) * \cos(\beta) - \cos^2(\beta) * \tan(\varphi) - \frac{K * \alpha}{1,5} * \cos(\beta) * \tan(\varphi)}{\sin(\beta) * \cos(\beta) + \sin^2(\beta) * \tan(\varphi)}. \quad (2.15.)$$

Metoda Carranza-Torrese – 2004

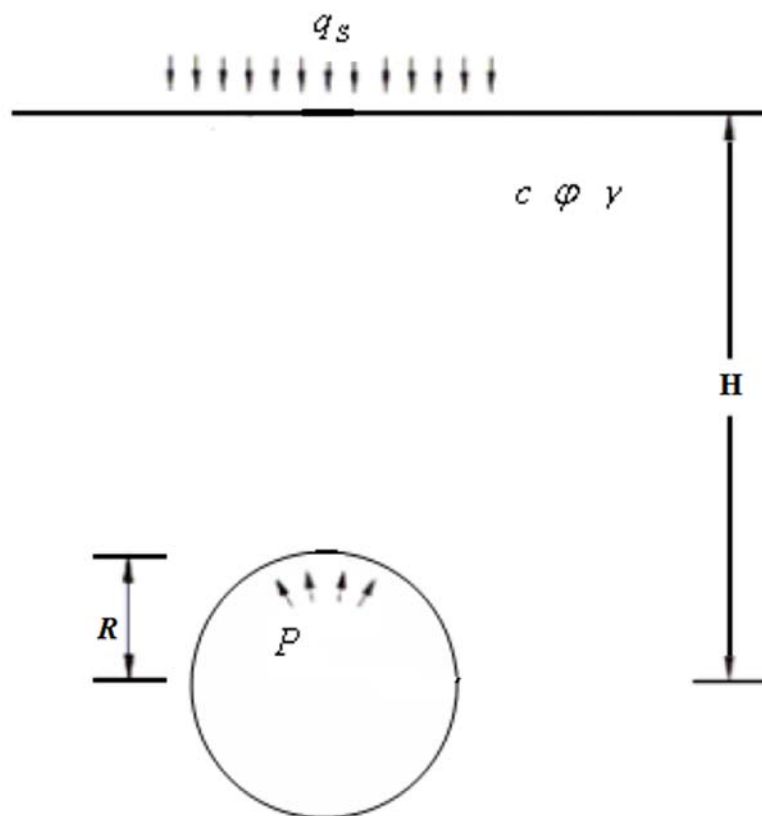
Metoda uvažuje rovnovážný stav selhání na čelbě tunelu ve tvaru kruhu a polokoule. V metodě je zaveden faktor bezpečnosti FS . Parametr K označuje tvar, pro tvar kruhu $K = 1$ a pro tvar polokoule $K = 2$. Stanovení minimálního stabilizačního tlaku na čelbě se vypočítá podle vzorce 2.16 [4]:

$$\begin{aligned} \frac{p}{\gamma * R} = & \left[\frac{q_s}{\gamma * R} + \frac{c}{\gamma * R} * \frac{1}{\tan(\varphi)} \right] * \left[\frac{h}{R} \right]^{-K(N_\varphi^{FS}-1)} - \frac{1}{K(N_\varphi^{FS} - 1) - 1} \\ & * \left[\left(\frac{h}{R} \right)^{1-K(N_\varphi^{FS}-1)} \right] - \frac{c}{\gamma * R} * \frac{1}{\tan(\varphi)}. \end{aligned} \quad (2.16.)$$

Kde N_φ^{FS} vypočitatelné pomocí vzorce 2.17 [4] představuje závislost na faktoru bezpečnosti FS , který lze vypočítat pomocí vzorce 2.18 [4] nebo ho vyjádřit číselnou hodnotou požadované bezpečnosti.

$$N_\varphi^{FS} = \frac{1 + \sin(\tan^{-1}(\frac{\tan(\varphi)}{FS}))}{1 - \sin(\tan^{-1}(\frac{\tan(\varphi)}{FS}))}, \quad (2.17.)$$

$$FS = \frac{c}{c^{cr}} = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\varphi^{cr})}. \quad (2.18.)$$

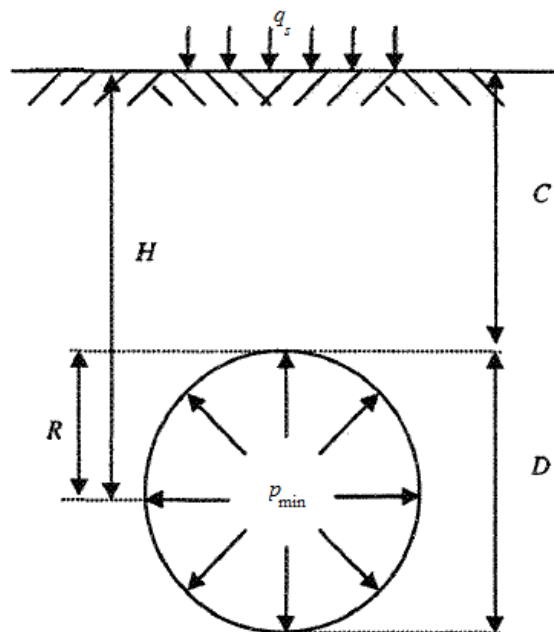


Obrázek 2.4.: Carranza-Torres - Model stability čelby [4]

2.2. Metody limitní analýzy - Upper and Lower bound theory

Metoda Atkinson & Potts – 1977

Metoda stanovení stability na čelby je založena na modelových zkouškách a teoretické analýze. Odhaduje řešení lower a upper bound pro stanovení minimálního stabilizačního tlaku na čelbu tunelu s přípustným plastickým chováním v dvourozměrné rovině deformace. Jedná se o limitní plastickou analýzu využívající podmínky rovinné napjatosti. Stanovuje minimální stabilizační tlak pro hladké otvory v nesoudržných zeminách. Metoda se rozděluje na řešení lower a upper bound.



Obrázek 2.5.: Atkinson & Potts - Model stability čelby [4]

Řešení lower bound

Řešení lze považovat za bezpečný odhad minimálního stabilizačního tlaku na čelbu tunelu. Výsledné řešení lower bound se dosáhne podle vzorce 2.19 [4]:

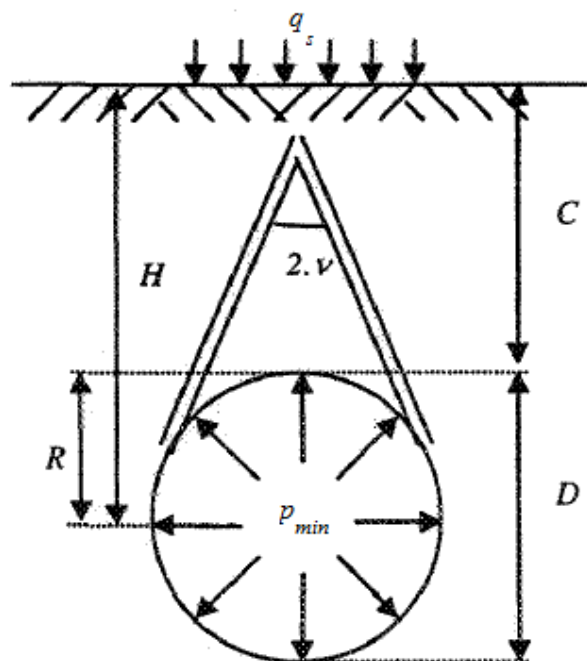
$$p_{min} = \frac{2 * K_p}{K_p^2 - 1} * \gamma * R. \quad (2.19.)$$

K_p je součinitel pasivního tlaku a vypočítá se podle vzorce 2.20 [4]:

$$K_p = \frac{(1 + \sin(\varphi))}{(1 - \sin(\varphi))}. \quad (2.20.)$$

Řešení upper bound

Popisuje nebezpečný odhad minimálního stabilizačního tlaku. Zabývá se skutečným zatížením vedoucím k selhání. To lze nalézt výběrem kinematického mechanismu a vhodným výpočtem pracovní rychlosti. Ukázka tohoto mechanismu je na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6.: *Atkinson & Potts - Upper bound mechanismus [1]*

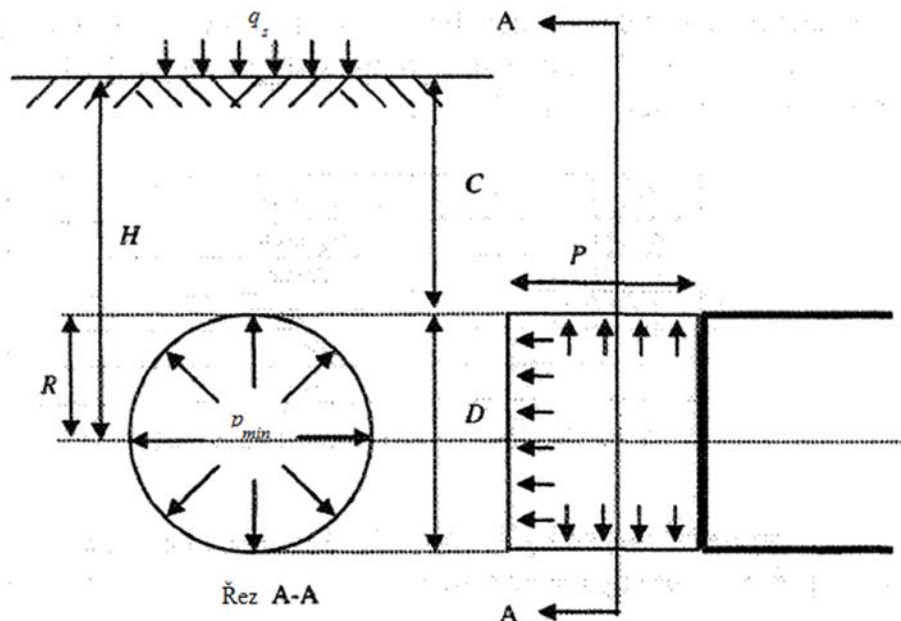
Pohyb klínu směrem do prostoru čelby tunelu takovou rychlostí, aby se zabránilo oddělování podélných stran. Výpočet podle vzorce 2.21 [1]:

$$p_{min} = \frac{\gamma * D}{4 * \cos(\varphi)} * \left(\frac{1}{\tan(\varphi)} + \varphi - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.21.)$$

Metoda Davis a spol. – 1980

Metoda zkoumá, co je nezbytné pro zachování stability čelby tunelu s různými parametry. Řešení je založeno na plastické deformaci prostředí, využívající rovinné napjatosti. Výpočet minimálního a maximálního stabilizačního tlaku v soudržných zeminách a homogenním prostředí. Kolaps čelby tunelu je obvykle náhlá událost, a proto pevnost zeminy je charakterizována jako neodvodněná smyková pevnost zeminy. Pro stabilitu kruhové nevyztužené části průřezu se zavádí vzdálenost P je to místo mezi čelbou tunelu a ostěním tunelu. Zvláštním řešením pro stabilitu čelby pomocí tunelovacího štítu je v tomto případě zavedena vzdálenost $P = 0$. Zemina je idealizována jako dokonale plastický materiál se soudržností. Základem této metody je jako u metody podle Bromse & Bennermaka poměrná stabilita N . Používá se pouze pro tunely budované v nízkém nadloží $C/D = 3$. Základní vzorec pro stanovení stabilizačního tlaku čelby 2.22 [1]:

$$p = \gamma * (C + R) - c_u * N + q_s. \quad (2.22.)$$



Obrázek 2.7.: Davis a spol. - Model stability čelby [4]

Řešení lower bound

Určení poměrné stability pro $C/D \leq 0,86$ podle vzorce 2.23 [1]:

$$N = 2 + 2 * \ln \left(\frac{2 * C}{D} + 1 \right). \quad (2.23.)$$

Poměrná stabilita pro $C/D \geq 0,86$ se stanovuje podle vzorce 2.24 [1]:

$$N = 4 * \ln \left(\frac{2 * C}{D} + 1 \right). \quad (2.24.)$$

Řešení upper bound

Mechanické selhání pro řešení upper bound minimálního stabilizačního tlaku na čelbu tunelu je uvedeno na obrázku 2.8.


$$N = 4 * \sqrt{\frac{C}{D} + \frac{1}{4}}. \quad (2.25.)$$
$$p_{min} = \gamma * (C + R) - 4 * c_u * \ln\left(\frac{C}{R} + 1\right) + q_s. \quad (2.26.)$$

23

Řešení upper bound

Směr pohybu se bude měnit obrácením znaménka ve vzorci poměrné stability 2.25. Řešení upper bound pro maximální stabilizační tlak lze stanovit podle vzorce 2.27 [1]:

$$N = -4 * \sqrt{\frac{C}{D} + \frac{1}{4}}. \quad (2.27.)$$

Řešení lower bound

Stanovení maximálního stabilizačního tlaku dostaneme obrácením znaménka ve vzorci 2.24. Pro stanovení maximálního stabilizačního tlaku dostaneme vzorec 2.28 [1]:

$$N = -4 * \ln\left(\frac{2 * C}{D} + 1\right). \quad (2.28.)$$

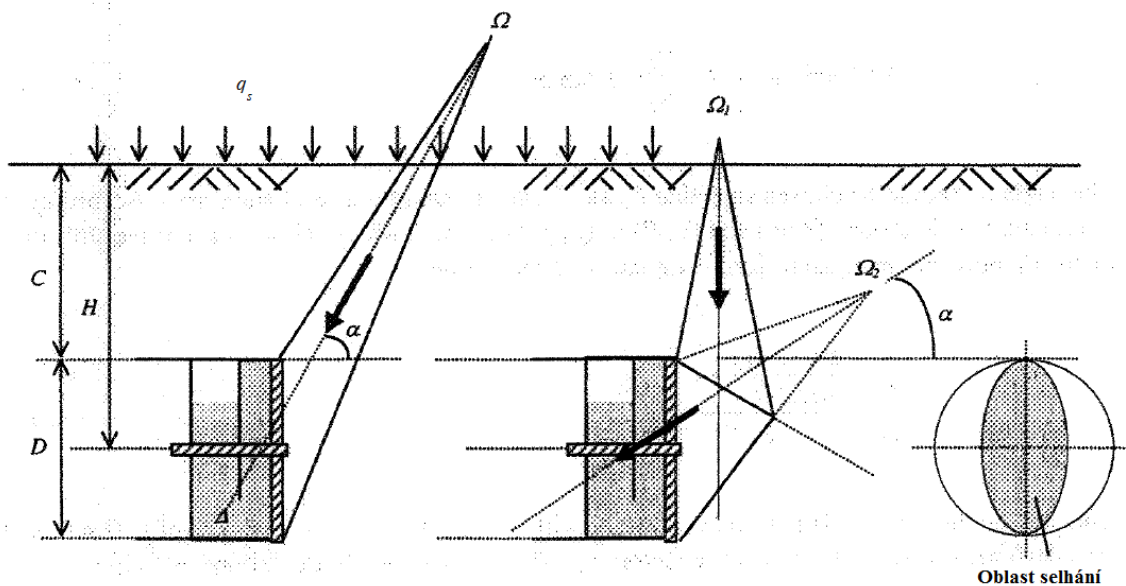
Metoda Leca & Dormieux – 1990

Minimální stabilizační tlak

Metoda zkoumá problém stability čelby tunelu v Mohr-Coulombovém materiálu z hlediska limitní analýzy. Vychází se z trojrozměrného modelu čelby. Řešení lower bound zkoumá tři stavy napjatosti v oblasti čelby tunelu. Řešení upper bound je analýza tří kinematických mechanismu. Spojením řešením lower a upper bound dostaneme stanovení stability čelby tunelu. Výsledky této metody jsou porovnatelné s experimentálními výsledky z centrifugy zkouškami.

Řešení upper bound pro kinematické mechanismy MI a MII

Mechanismus MI předpokládá selhání jednoho kuželového bloku. Mechanismus MII předpokládá selhání dvou kuželových bloku. Oba mechanismy jsou průsečíky čelby s přilehlým kuželem a tvoří elipsu. Mechanismus se vyznačuje úhlem α mezi osou kužele a vodorovnou osou tunelu. Mechanismy MI a MII jsou zobrazeny na obrázku 2.9.



Obrázek 2.9.: Leca & Dormieux - Upper bound - Mechanismus MI a MII [1]

Řešení upper bound stanovuje parametry zatížení. Jsou definovány jako vzorce 2.29, 2.30 a 2.31 [7]. Tyto rovnice se taky používají pro řešení lower bound.

$$Q_s = (K_p - 1) * \frac{q_s}{\sigma_{uc}} + 1, \quad (2.29.)$$

$$Q_t = (K_p - 1) * \frac{\sigma_t}{\sigma_{uc}} + 1, \quad (2.30.)$$

$$Q_\gamma = (K_p - 1) * \frac{D * \gamma}{\sigma_{uc}}. \quad (2.31.)$$

Prostá pevnost v tahu σ_{uc} je vyjádřena jako vzorec 2.32 [7]:

$$\sigma_{uc} = 2 * \frac{c * \cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}. \quad (2.32.)$$

Řešení upper bound pro selhání může být definováno v následném obecném vzorci 2.33 [7]:

$$N_s * Q_s + N_\gamma * Q_\gamma \leq Q_t. \quad (2.33.)$$

Bezrozměrné faktory N_s a N_γ jsou určeny samostatně pro každý mechanismus.

Mechanismus selhání MI pro řešení upper bound

Hodnoty bezrozměrných faktorů N_s a N_γ pro mechanismus selhání MI lze zjistit následujícími vzorci 2.34 a 2.35 [4]. Index c^+ představuje řešení upper bound.

$$N_s^{c+} = \frac{1}{\cos(2 * \varphi) - \cos(2 * \alpha)} * \frac{R_D^2}{R_E} * \tan(\alpha), \quad (2.34.)$$

$$N_\gamma^{c+} = \frac{1}{3} * R_B * \left(1 - \frac{R_D^3}{R_E^3}\right) * \tan(\alpha). \quad (2.35.)$$

Úhel α by měl být zvolen tak, že N_s a N_γ jsou na své maximální hodnotě. Rovnice 2.34 a 2.35 se používají pouze v případě, kdy selhání dosáhne povrchu. Geometrický faktor R_D se v tomto případě bude rovnat nule, jestliže bude pravdivá nerovnice 2.36 [7]:

$$\frac{C}{D} \geq \frac{\frac{\sin(2 * \alpha)}{\sin(2 * \varphi)} - 1}{2}. \quad (2.36.)$$

Geometrické faktory R_A 2.37, R_B 2.38, R_C 2.39, R_D 2.40 a R_E 2.41 jsou definované v následujících vzorcích [7]:

$$R_A = \frac{\sqrt{\cos(\alpha - \varphi) * \cos(\alpha + \varphi)}}{\cos(\varphi)}, \quad (2.37.)$$

$$R_B = \frac{\cos(\alpha - \varphi) * \cos(\alpha + \varphi)}{\sin(2 * \varphi)}, \quad (2.38.)$$

$$R_C = \frac{\cos(\alpha)}{\tan(\varphi)}, \quad (2.39.)$$

$$R_D = \sin(2 * \alpha) - \frac{2 * H}{D} * \sin(2 * \varphi) = 0, \quad (2.40.)$$

$$R_E = \sqrt{\sin(2 * (\alpha - \varphi)) * \sin(2 * (\alpha + \varphi))}. \quad (2.41.)$$

Mechanismus selhání MII pro řešení upper bound

Bezrozměrné faktory N_s a N_γ pro mechanismus selhání MII se vypočítají podle vzorců 2.42 a 2.43 [7]:

$$N_s^{c+} = \frac{1}{\cos(\alpha) * \cos^2(\varphi)} * \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)} * \frac{R_E^2}{R_A}, \quad (2.42.)$$

$$N_{\gamma}^{c+} = \frac{1}{3} * \left(\tan(\alpha) * R_B + \frac{\cos(\varphi) * \cos(\beta + \varphi)}{2 * \sin(\varphi) * \sin(\beta + \varphi)} \right. \\ \left. - \frac{1}{2 * \sin(\varphi) * \cos(\alpha) * \cos^2(\varphi)} * \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)} * \frac{R_E^3}{R_A} \right). \quad (2.43.)$$

Úhel α by měl být zvolen tak, že N_s a N_{γ} jsou na své maximální hodnotě. Rovnice 2.42 a 2.43 se vztahuje pouze v případě, kdy selhání dosáhne povrchu. Geometrický faktor R_E se v tomto případě bude rovnat nule, jestliže bude pravdivá nerovnice 2.44 [7]:

$$\frac{C}{D} \geq \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{2 * \sin(\varphi)} * \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)}. \quad (2.44.)$$

Geometrické faktory R_A 2.45, R_B 2.46, R_C 2.47, R_D 2.48 a R_E 2.49 jsou definované v následujících vzorcích [7]:

$$R_A = \frac{\sqrt{\cos(\alpha - \varphi) * \cos(\alpha + \varphi)}}{\cos(\varphi)}, \quad (2.45.)$$

$$R_B = \frac{\cos(\alpha - \varphi) * \cos(\alpha + \varphi)}{\sin(2 * \varphi)}, \quad (2.46.)$$

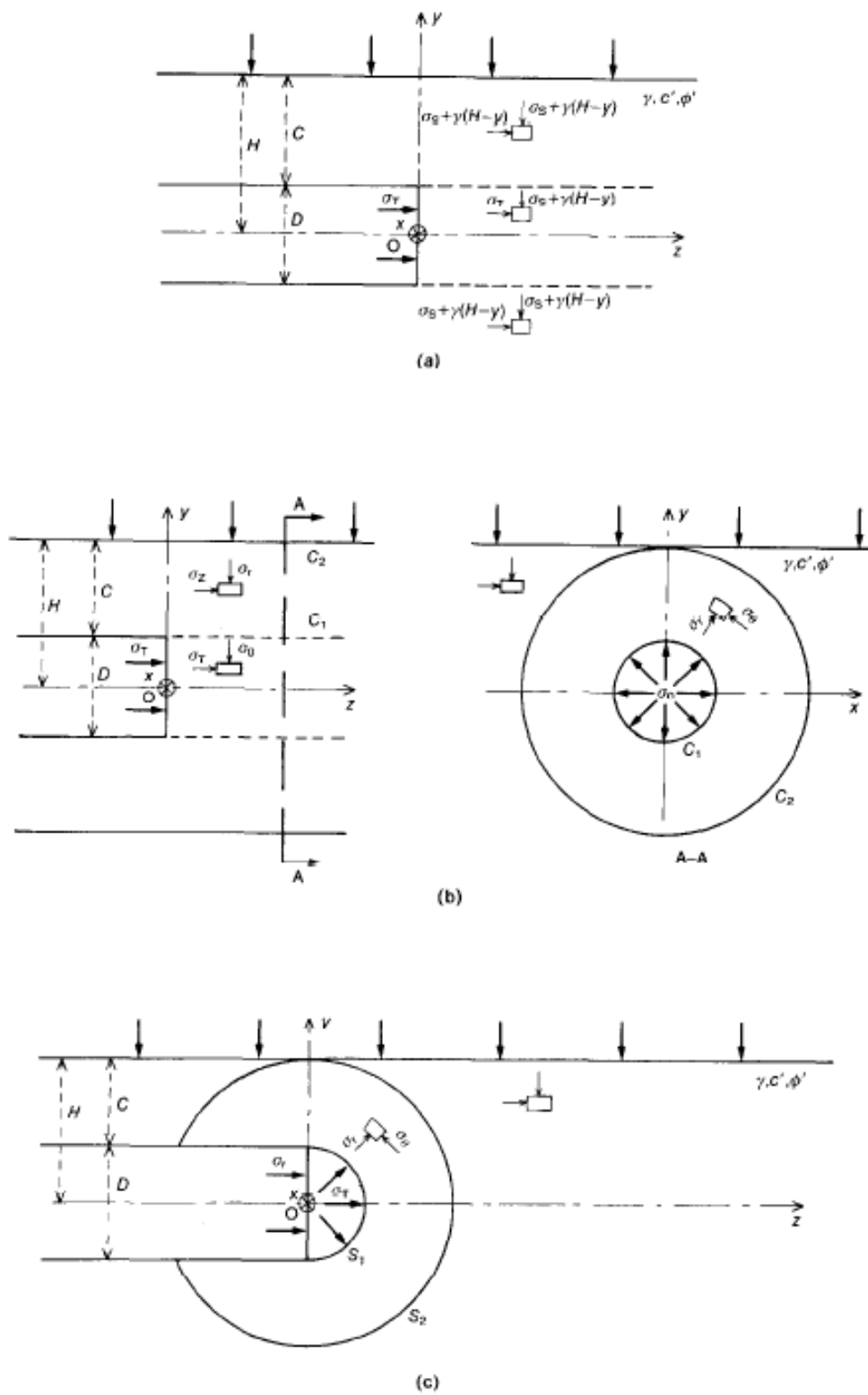
$$R_C = \frac{\cos(\alpha + \varphi)}{\cos(\varphi)} * \sqrt{\frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)}}, \quad (2.47.)$$

$$R_D = \frac{\sin(\beta)}{\sin(\varphi) * \sin(\beta + \varphi)}, \quad (2.48.)$$

$$R_E = \frac{\cos^2(\varphi)}{\cos(\alpha + \varphi)} * R_C - \frac{2 * C}{D} = 0. \quad (2.49.)$$

Řešení lower bound pro selhání SI, SII a SIII

Pro řešení lower bound máme tři řešení napjatosti, které jsou zobrazeny na obrázku 2.10. Napjatosti SI, SII a SIII splňují rovnice rovnováhy a okrajové podmínky v této problematice.



Obrázek 2.10.: Leca & Dormieux - Lower bound - Napjatost SI (a), SII (b) a SIII (c) [7]

Řešení lower bound lze stanovit z těchto napjatostí za předpokladu, že kritérium únosnosti není překročeno hmotnosti zeminy. Každé pole napjatosti přináší konkrétní nerovnost. Tři nerovnosti mohou být popsány obecně jako u řešení upper bound 2.33. Parametry zatížení v rovnicích 2.29, 2.30 a 2.31 budou použity pro řešení upper bound.

Hodnoty bezrozměrných parametru N_s a N_γ pro řešení selhání lower bound lze zjistit z následujících vzorců. Index c^- k značení řešení lower bound.

Pro napjatost SI je určeno ve vzorci 2.50 a 2.51 [7]:

$$N_s^{c^-} = K_a, \quad (2.50.)$$

$$N_\gamma^{c^-} = K_a * \left(\frac{C}{D} + 1 \right). \quad (2.51.)$$

Pro napjatost SII je určeno ve vzorci 2.52 [7]:

$$N_s^{c^-} = K_a * \left(2 * \frac{C}{D} + 1 \right)^{1-K_p}. \quad (2.52.)$$

Pro napjatost SIII je určeno ve vzorci 2.53 [7]:

$$N_s^{c^-} = \left(2 * \frac{C}{D} + 1 \right)^{2*(1-K_p)}. \quad (2.53.)$$

Řešení upper a lower bound pro stanovení minimálního stabilizačního tlaku

S následujícími rovnicemi lze vypočítat minimální stabilizační tlak na čelbu tunelu, s řešením upper bound mechanismem selhání MI a MII a řešením lower bound napjatosti SI, SII a SIII.

Pro $c = 0 \text{ kPa}$ je řešení podle vzorce 2.54 [7]:

$$p_{min} = N_s * q_s + N_\gamma * \gamma * D. \quad (2.54.)$$

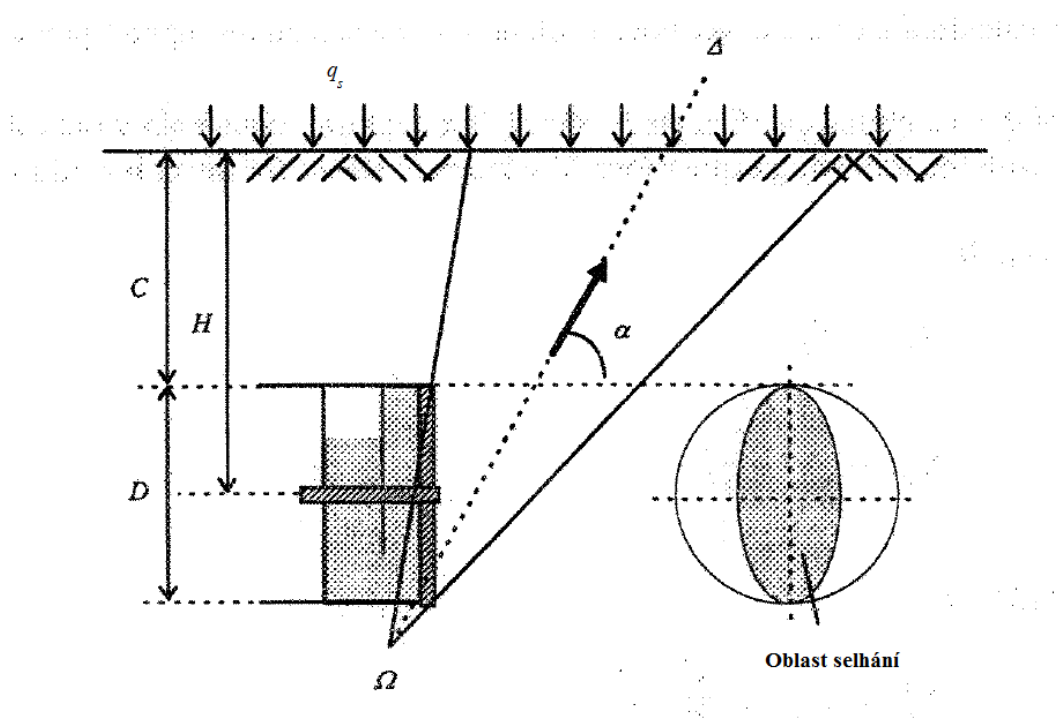
Pro $c > 0 \text{ kPa}$ je řešení podle vzorce 2.55 [7]:

$$p_{min} = \frac{Q_t - 1}{K_p - 1} * \sigma_{uc}. \quad (2.55.)$$

Je třeba poznamenat, že pro SII a SIII faktor zatížení Q_γ není přítomen v řešení. To znamená, že bezrozměrný faktor N_γ je roven nule pro SII a SIII.

Maximální stabilizační tlak

Řešení upper a lower bound ke stanovení stabilizačního tlaku na čelbu tunelu pro kinetický mechanismus selhání MIII, takzvané vystrčení je zobrazeno na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11.: Leca & Dormieux - Upper bound - Mechanismus MII [1]

Řešení upper bound pro mechanismus selhání MIII „vystrčení“

Řešení upper bound maximálního stabilizačního tlaku se stanovuje pro mechanismus selhání MIII, který je zobrazen na obrázku 2.11. Geometrie mechanismu MIII je podobná jako u mechanismu MI, kromě toho, že kužel je převrácen a rychlost je opačná. Průsečík čelby s přilehlým kuželem tvoří elipsu.

Parametry zatížení popsány vzorci 2.29, 2.30 a 2.31 jsou stejné jako u stanovení minimálního stabilizačního tlaku. Řešení upper bound pro maximální stabilizační tlak může být uvedena jako rovnice 2.56 [7]:

$$N_s * Q_s + N_\gamma * Q_\gamma \geq Q_t. \quad (2.56.)$$

Mechanické selhání MIII řešeno upper bound

Bezrozměrné faktory N_s a N_γ mechanismus selhání MIII lze zjistit, podle následných vzorců 2.57 a 2.58 [7]. Index b^+ je značení pro řešení upper bound mechanismu selhání MIII vystrčení.

$$N_s^{b+} = \frac{R_B * R_C^2}{R_A}, \quad (2.57.)$$

$$N_\gamma^{b+} = \frac{\sin(\alpha)}{3 * R_A * \sin(2 * \varphi)} * \left(\left(\frac{R_B * R_C}{\sin(\alpha)} \right)^3 - \left(\frac{R_A}{\cos(\alpha)} \right)^3 \right). \quad (2.58.)$$

Nejlepším řešením upper bound spojeno s mechanismem selhání MIII je nalezením úhlu α , tak aby faktory N_s a N_γ byly na svém maximu. Geometrické faktory R_A 2.59, R_B 2.60 a R_C 2.61 jsou definované v následujících vzorcích [7]:

$$R_A = \cos(\alpha) * \sqrt{\cos(\alpha - \varphi) * \cos(\alpha + \varphi)}, \quad (2.59.)$$

$$R_B = \sin(\alpha) * \sqrt{\sin(\alpha - \varphi) * \cos(\alpha + \varphi)}, \quad (2.60.)$$

$$R_C = \frac{\sin(2 * \alpha) + \left(2 * \frac{C}{D} + 1 \right) * \sin(\varphi)}{\cos(2 * \varphi) - \cos(2 * \alpha)}. \quad (2.61.)$$

Řešení lower bound pro vystrčení pomocí napjatosti SI, SII a SIII

Řešení lower bound maximálního stabilizačního tlaku tvořenou třemi napjatostmi SI, SII a SIII zobrazeného na obrázku 2.10. Nerovnice lze napsat jako u řešení upper bound vzorcem 2.56. Parametry zatížení v rovnicích 2.29, 2.30 a 2.31 budou použity pro řešení upper bound.

Hodnoty bezrozměrných parametru N_s a N_γ pro řešení selhání lower bound lze zjistit z následujících vzorců. Index b^- k značení řešení lower bound.

Pro napjatost SI je určeno ve vzorci 2.62 a 2.63 [7]:

$$N_s^{b-} = K_p, \quad (2.62.)$$

$$N_\gamma^{b-} = K_p * \left(\frac{C}{D} \right). \quad (2.63.)$$

Pro napjatost SII je určeno ve vzorci 2.64 [7]:

$$N_s^{b-} = K_p * \left(2 * \frac{C}{D} + 1\right)^{1-K_a}. \quad (2.64.)$$

Pro napjatost SIII je určeno ve vzorci 2.65 [7]:

$$N_s^{b-} = \left(2 * \frac{C}{D} + 1\right)^{2*(1-K_a)}. \quad (2.65.)$$

Řešení upper a lower bound pro stanovení maximálního stabilizačního tlaku

Pro $c = 0kPa$ je řešení podle vzorce 2.66 [7]:

$$p_{max} = N_s * q_s + N_\gamma * \gamma * D. \quad (2.66.)$$

Pro $c > 0kPa$ je řešení podle vzorce 2.67 [7]:

$$p_{max} = \frac{Q_t - 1}{K_p - 1} * \sigma_{uc}. \quad (2.67.)$$

Je třeba poznamenat, že pro SII a SIII faktor zatížení Q_γ není přítomen v řešení. To znamená, že bezrozměrný faktor N_γ je roven nule pro SII a SIII.

Doplňující informace

Rovnice 2.33 a 2.56 jsou rovnice pro stanovení únosnosti základu. Pro tunely raženy v nesoudržných zeminách je prostá pevnost v tlaku $\sigma_{uc} = 0$. Rovnice 2.54 a 2.66 jsou určeny pro nesoudržné zeminy. Úhel α se počítá pomocí vzorce 2.68 [4]:

$$\alpha = 49 - \frac{\varphi}{2}. \quad (2.68.)$$

Úhel skluzu β se počítá pomocí vzorce 2.69 [4]:

$$\beta = \frac{180}{4} - \frac{\alpha}{2}. \quad (2.69.)$$

3. Sestavení kalkulátorů pro výpočet stabilizačního tlaku na čelbu v prostředí Excel

V prostředí Excel byly sestaveny výpočty, které se rozdělily do tří částí. První část je analytická, zde byly provedeny výpočty se změnami vstupních parametrů. Výpočty v druhé části jsou sestaveny pro zeminy charakterizované v ČSN 73 1001. Třetí část je sestavena jako Makro. U všech metod v prostředí Excel jsou uvedeny výpočtové vzorce a model stability čelby.

3.1. Analytická část

Zde jsou provedeny výpočty pro soudržné zeminy, nesoudržné zeminy a srovnání jednotlivých analytických metod. Použité metody pro soudržné zeminy Broms & Bennermark, Davis a spol., Krause (čtvrtkruh, polokoule a půlkruh), Jancsecz & Steiner a Vermeer & Ruse. Výpočty pro nesoudržné zeminy Atkinson & Potts (Lower bound a Upper bound), Leca & Dormieux, Vermeer & Ruse, Krause (čtvrtkruh, polokoule a půlkruh). Ve srovnání byly porovnány metody, které mají stejné vstupní parametry. V některých případech u metod použitých pro soudržné zeminy docházelo k tomu, že minimální stabilizační tlak vycházel v záporných hodnotách, zde není nutné čelbu stabilizovat.

3.2. Vlastnosti zemin dle směrných normových charakteristik dle ČSN 73 1001

Stanovení stabilizačního tlaku podle Carranza-Torrese. Vstupní data pro třídy jemnozrnných zemin byla získána z normy ČSN 73 1001. Jednotlivé vlastnosti jemnozrnných zemin jsou uvedeny v tabulce normy ČSN 73 1001, tato tabulka je přidána do příloh a označena jako příloha 1.

3.3. Makro

Pro správné použití Makro výpočtů je důležité znát geometrické parametry daného modelu, i správné jednotky vstupních parametrů. Což zahrnuje objemovou tíhu zeminy γ [kNm^{-3}],

výšku nadloží C [m], poloměr tunelu R [m], přetížení na povrchu q_s [kPa], neodvodněnou smykovou pevnost c_u [kPa], soudržnost zeminy c [kPa], úhel vnitřního tření zeminy φ [°]. Tak aby stanovený stabilizační tlak vyšel p [kPa]. Makro výpočty byly sestaveny pro metody podle Davis a spol., Krause (porušení půlkruh, čtvrtkruh a polokoule), Broms & Bennermark, Atkinson & Potts (Lower a Upper bound) a Vermeer & Ruse. Spuštění je velice jednoduché, stačí kliknutí na příkazové tlačítko s názvem dané metody. Ukázka sestaveného programu je v příloze 2.

4. Variantní parametrické výpočty pro stanovení stabilizačního tlaku pro různé faktory

4.1. Soudržné zeminy

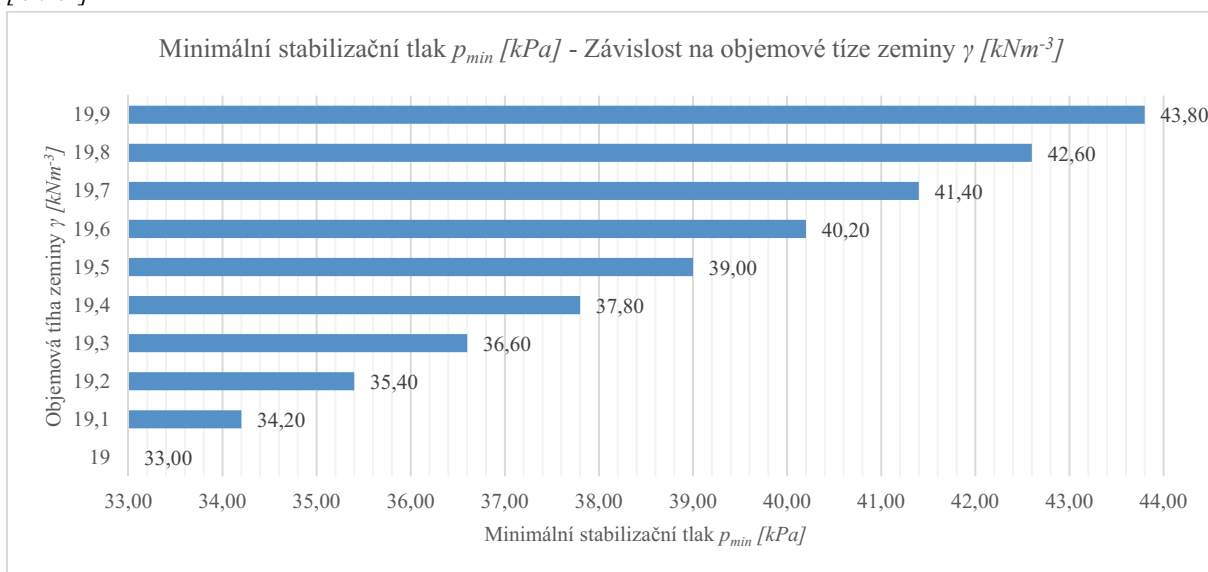
Broms & Bennermark

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.2. Poměrná stabilita N byla zvolena $N = 6$ pro stanovení minimálního stabilizačního tlaku na čelbu tunelu. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Výška nadloží byla volena v rozsahu $C = 10 \sim 37 \text{ m}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Přetížení na povrchu bylo voleno v rozsahu $q_s = 0 \sim 45 \text{ kPa}$. Neodvodněná smyková pevnost byla volena v rozsahu $c_u = 40 \sim 67 \text{ kPa}$.

Tabulka 4.1.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na objemové tíze zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$

Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$	Objemová tíha zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$	Výška nadloží $C [\text{m}]$	Poloměr tunelu $R [\text{m}]$	Přetížení na povrchu $q_s [\text{kPa}]$	Neodvodněná smyková pevnost $c_u [\text{kPa}]$
33,00	19	10	2	45	40
34,20	19,1	10	2	45	40
35,40	19,2	10	2	45	40
36,60	19,3	10	2	45	40
37,80	19,4	10	2	45	40
39,00	19,5	10	2	45	40
40,20	19,6	10	2	45	40
41,40	19,7	10	2	45	40
42,60	19,8	10	2	45	40
43,80	19,9	10	2	45	40

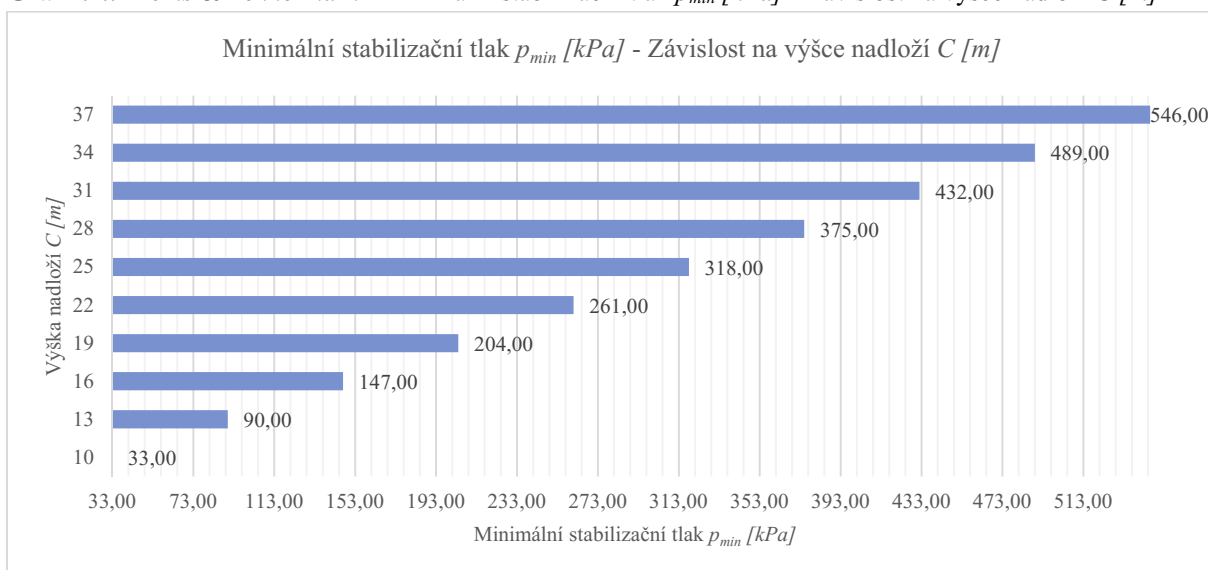
Graf 4.1.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.2.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Výška nadloží C [m]	Poloměr tunelu R [m]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]	Neodvodněná smyková pevnost c_u [kPa]
33,00	19	10	2	45	40
90,00	19	13	2	45	40
147,00	19	16	2	45	40
204,00	19	19	2	45	40
261,00	19	22	2	45	40
318,00	19	25	2	45	40
375,00	19	28	2	45	40
432,00	19	31	2	45	40
489,00	19	34	2	45	40
546,00	19	37	2	45	40

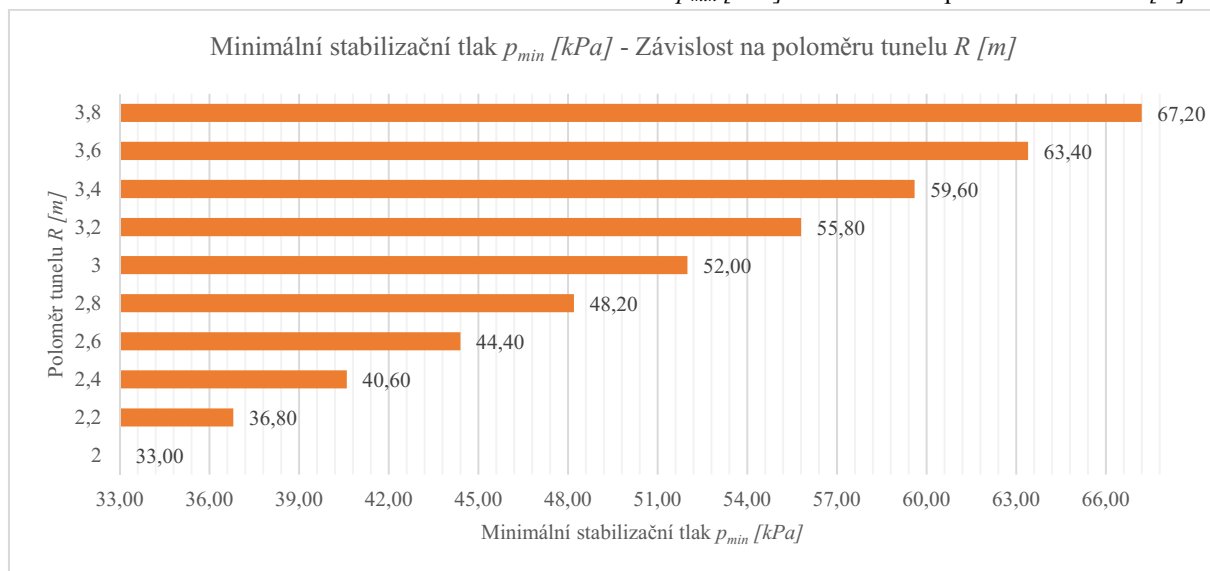
Graf 4.2.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m]



Tabulka 4.3.: *Broms & Bennermark* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Výška nadloží C [m]	Poloměr tunelu R [m]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]	Neodvodněná smyková pevnost c_u [kPa]
33,00	19	10	2	45	40
36,80	19	10	2,2	45	40
40,60	19	10	2,4	45	40
44,40	19	10	2,6	45	40
48,20	19	10	2,8	45	40
52,00	19	10	3	45	40
55,80	19	10	3,2	45	40
59,60	19	10	3,4	45	40
63,40	19	10	3,6	45	40
67,20	19	10	3,8	45	40

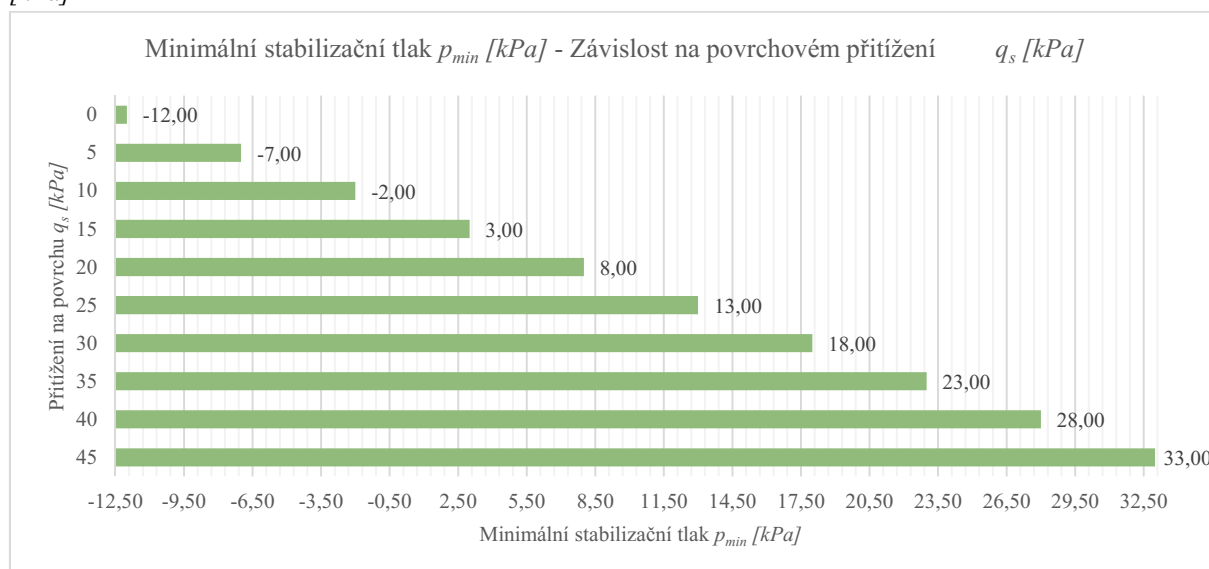
Graf 4.3.: *Broms & Bennermark* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.4.: *Broms & Bennermark* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přetížení q_s [kPa]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Výška nadloží C [m]	Poloměr tunelu R [m]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]	Neodvodněná smyková pevnost c_u [kPa]
33,00	19	10	2	45	40
28,00	19	10	2	40	40
23,00	19	10	2	35	40
18,00	19	10	2	30	40
13,00	19	10	2	25	40
8,00	19	10	2	20	40
3,00	19	10	2	15	40
-2,00	19	10	2	10	40
-7,00	19	10	2	5	40
-12,00	19	10	2	0	40

Graf 4.4.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přitížení q_s [kPa]



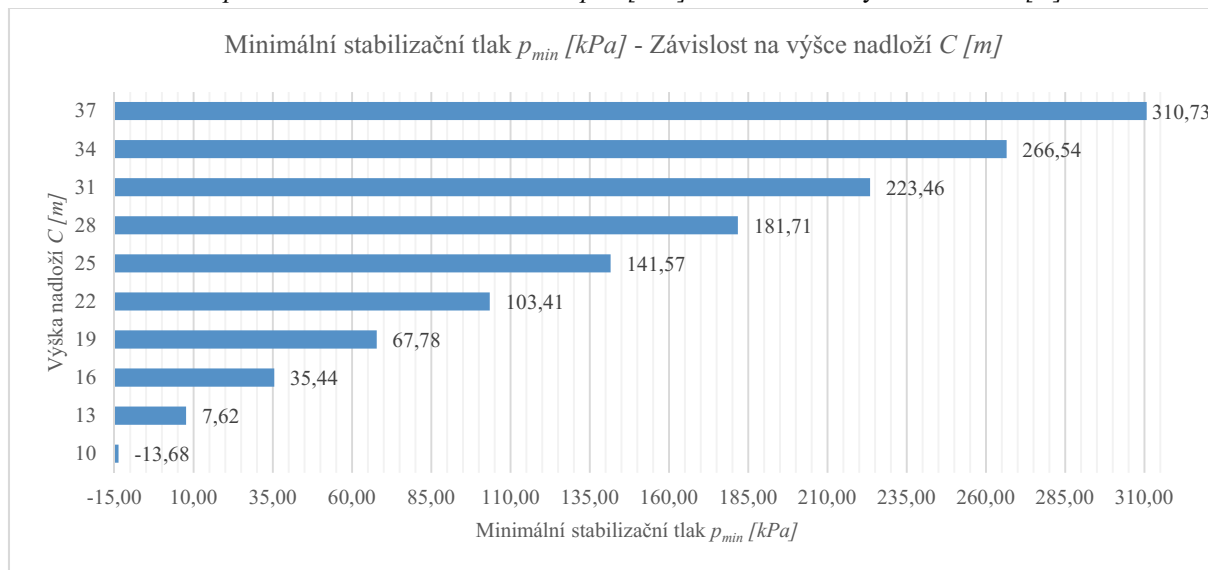
Davis a spol.

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.26. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Výška nadloží byla volena v rozsahu $C = 10 \sim 37 \text{ m}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Přítížení na povrchu bylo voleno v rozsahu $q_s = 0 \sim 45 \text{ kPa}$. Neodvodněná smyková pevnost byla volena v rozsahu $c_u = 40 \sim 67 \text{ kPa}$.

Tabulka 4.5.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Výška nadloží C [m]	Poloměr tunelu R [m]	Neodvodněná smyková pevnost c_u [kPa]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]
-13,68	19	10	2	40	45
7,62	19	13	2	40	45
35,44	19	16	2	40	45
67,78	19	19	2	40	45
103,41	19	22	2	40	45
141,57	19	25	2	40	45
181,71	19	28	2	40	45
223,46	19	31	2	40	45
266,54	19	34	2	40	45
310,73	19	37	2	40	45

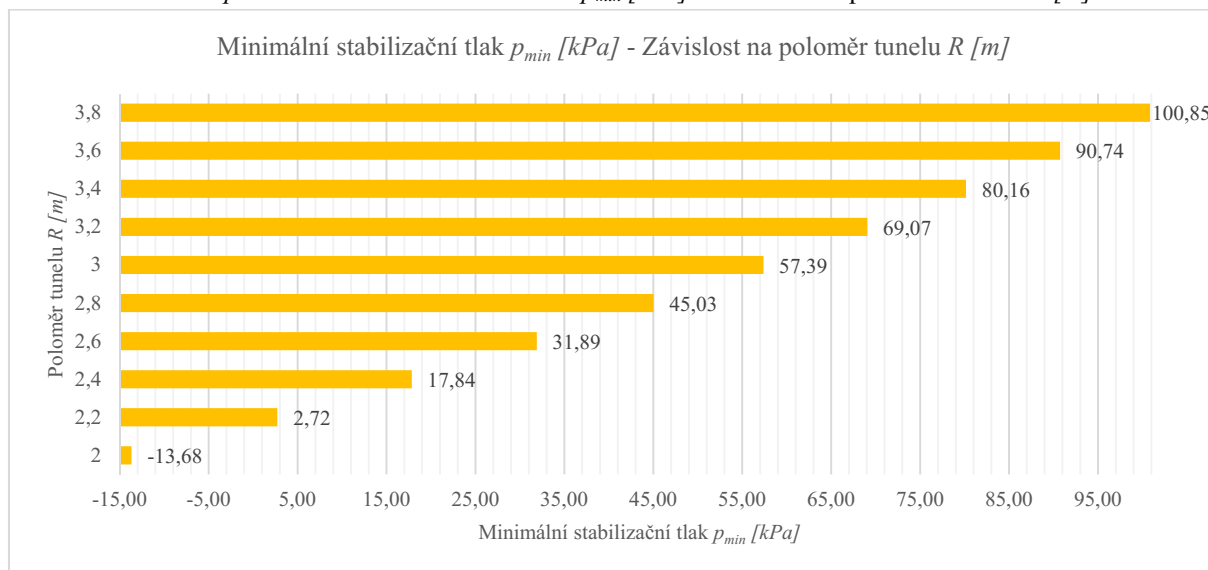
Graf 4.5.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m]



Tabulka 4.6.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Výška nadloží C [m]	Poloměr tunelu R [m]	Neodvodněná smyková pevnost c_u [kPa]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]
-13,68	19	10	2	40	45
2,72	19	10	2,2	40	45
17,84	19	10	2,4	40	45
31,89	19	10	2,6	40	45
45,03	19	10	2,8	40	45
57,39	19	10	3	40	45
69,07	19	10	3,2	40	45
80,16	19	10	3,4	40	45
90,74	19	10	3,6	40	45
100,85	19	10	3,8	40	45

Graf 4.6.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Krause

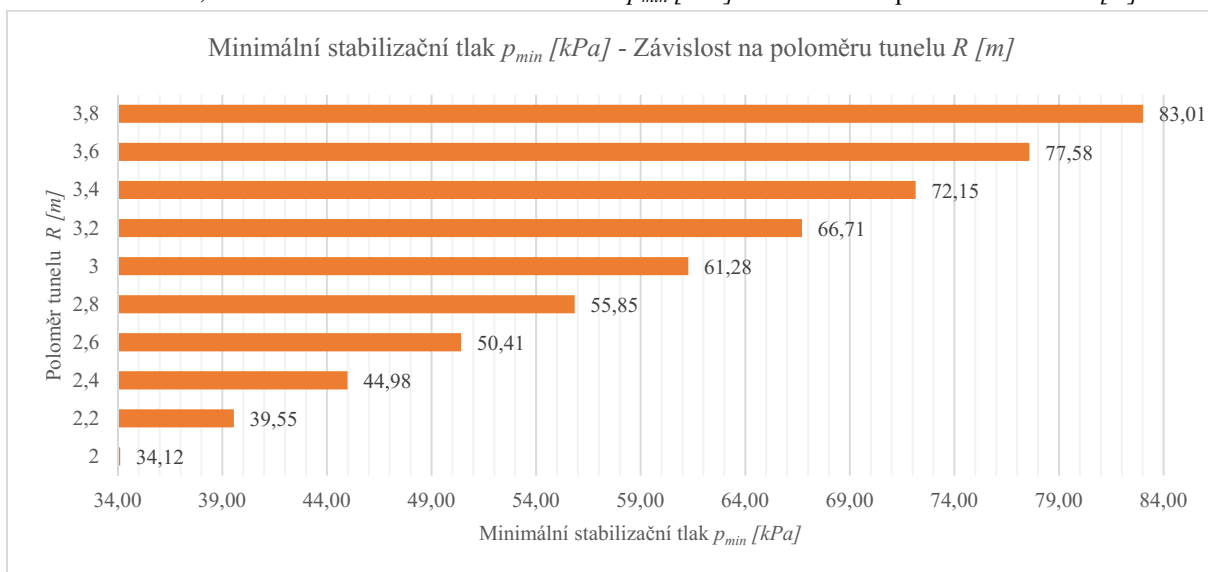
Čtvrtkruh

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.4. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Soudržnost zeminy byla volena v rozsahu $c = 6 \sim 15 \text{ kPa}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$.

Tabulka 4.7.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na poloměru tunelu $R [\text{m}]$

Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$	Poloměr tunelu $R [\text{m}]$	Objemová tíha zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$	Soudržnost $c [\text{kPa}]$	Úhel vnitřního tření $\varphi [^\circ]$
34,12	2	19	6	25
39,55	2,2	19	6	25
44,98	2,4	19	6	25
50,41	2,6	19	6	25
55,85	2,8	19	6	25
61,28	3	19	6	25
66,71	3,2	19	6	25
72,15	3,4	19	6	25
77,58	3,6	19	6	25
83,01	3,8	19	6	25

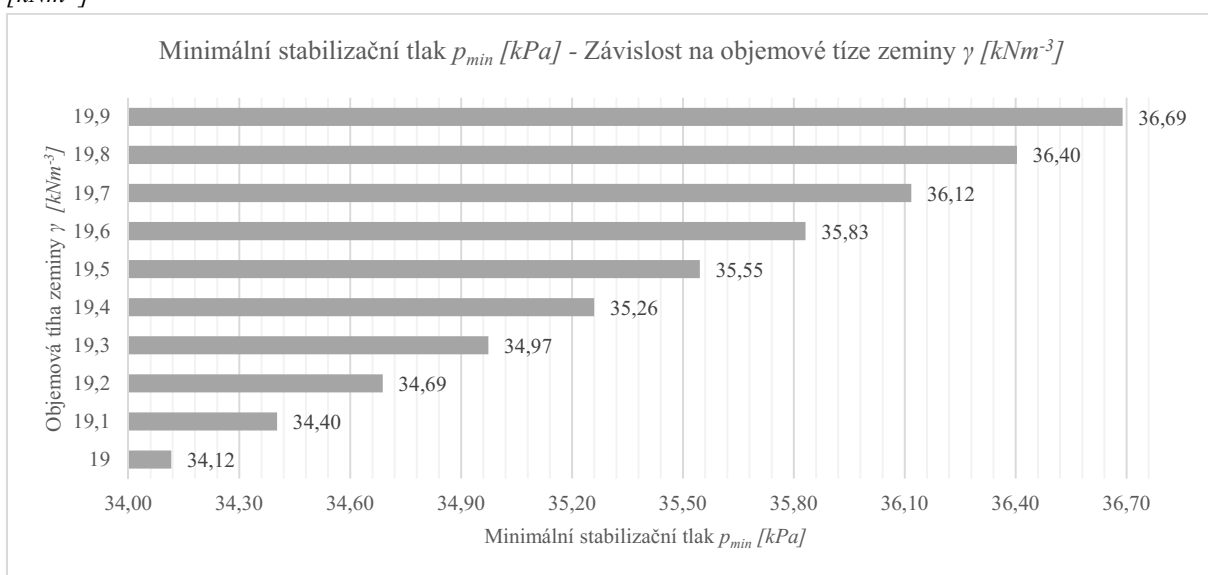
Graf 4.7.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na poloměru tunelu $R [\text{m}]$



Tabulka 4.8.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
34,12	2	19	6	25
34,40	2	19,1	6	25
34,69	2	19,2	6	25
34,97	2	19,3	6	25
35,26	2	19,4	6	25
35,55	2	19,5	6	25
35,83	2	19,6	6	25
36,12	2	19,7	6	25
36,40	2	19,8	6	25
36,69	2	19,9	6	25

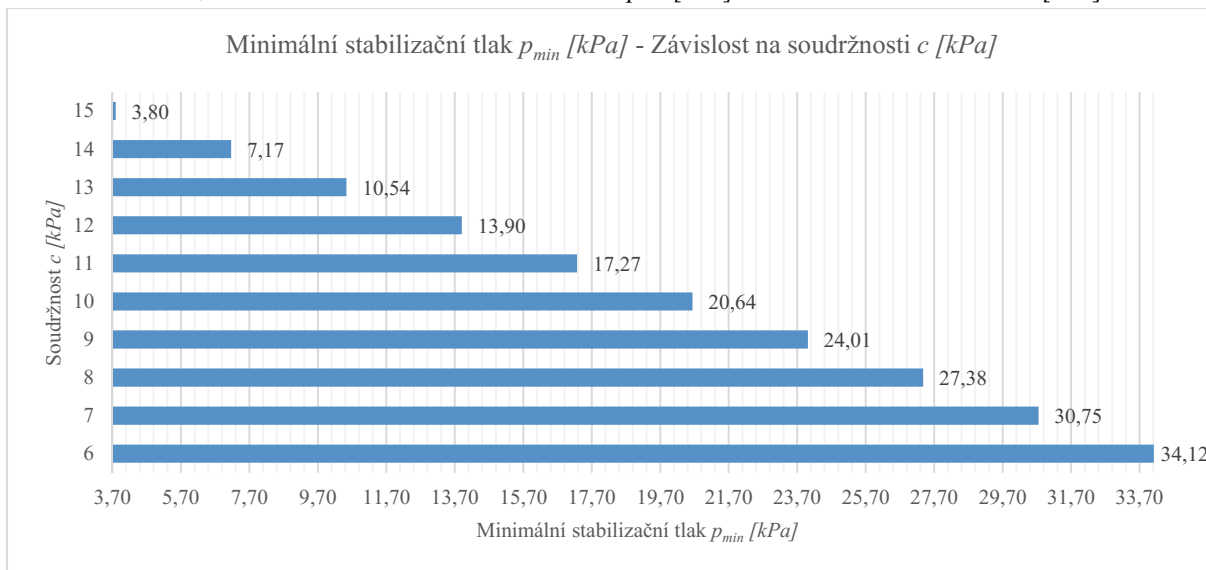
Graf 4.8.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.9.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na soudržnosti c [kPa]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
34,12	2	19	6	25
30,75	2	19	7	25
27,38	2	19	8	25
24,01	2	19	9	25
20,64	2	19	10	25
17,27	2	19	11	25
13,90	2	19	12	25
10,54	2	19	13	25
7,17	2	19	14	25
3,80	2	19	15	25

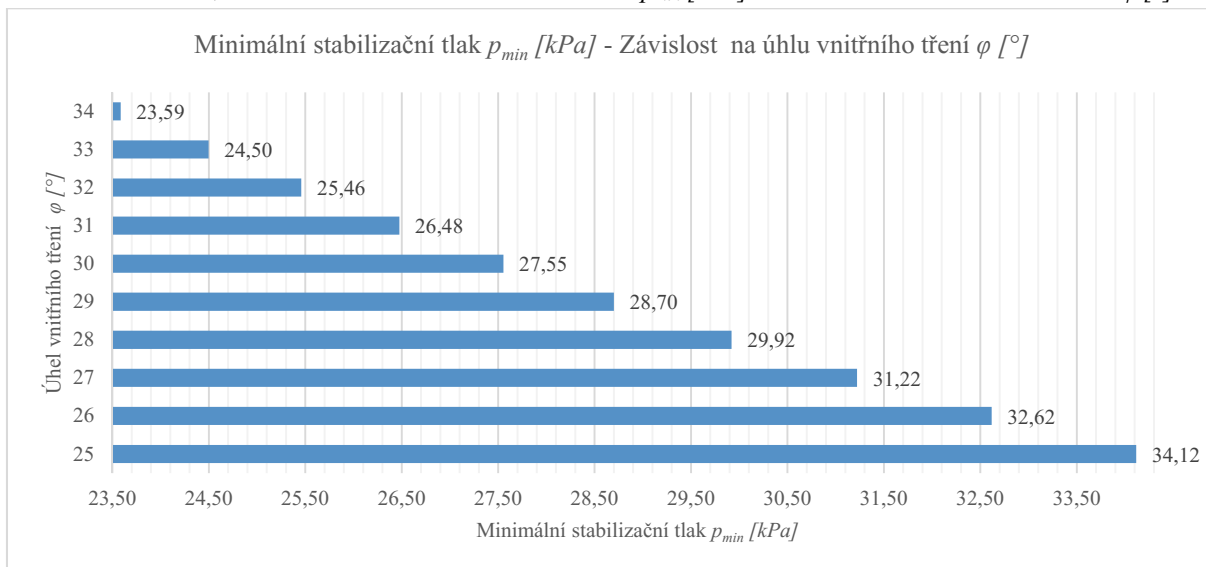
Graf 4.9.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na soudržnosti c [kPa]



Tabulka 4.10.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]
34,12	2	19	6	25
32,62	2	19	6	26
31,22	2	19	6	27
29,92	2	19	6	28
28,70	2	19	6	29
27,55	2	19	6	30
26,48	2	19	6	31
25,46	2	19	6	32
24,50	2	19	6	33
23,59	2	19	6	34

Graf 4.10.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



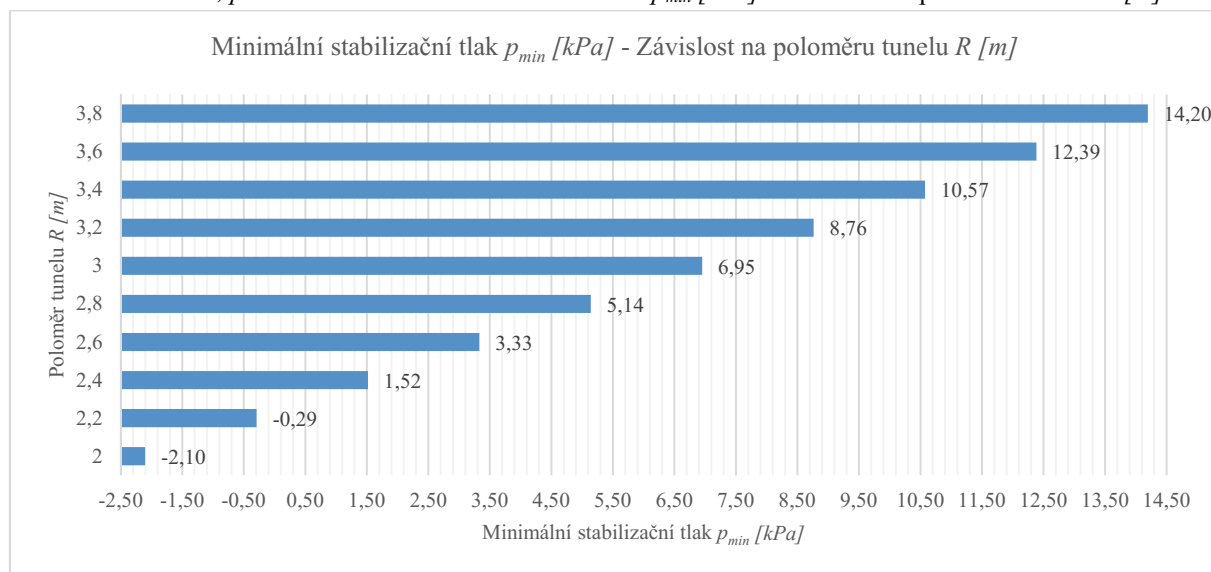
Polokoule

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.5. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Soudržnost zeminy byla volena v rozsahu $c = 6 \sim 15 \text{ kPa}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$.

Tabulka 4.11.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na poloměru tunelu $R [\text{m}]$

Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$	Poloměr tunelu $R [\text{m}]$	Objemová tíha zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$	Soudržnost $c [\text{kPa}]$	Úhel vnitřního tření $\varphi [^\circ]$
-2,10	2	19	6	25
-0,29	2,2	19	6	25
1,52	2,4	19	6	25
3,33	2,6	19	6	25
5,14	2,8	19	6	25
6,95	3	19	6	25
8,76	3,2	19	6	25
10,57	3,4	19	6	25
12,39	3,6	19	6	25
14,20	3,8	19	6	25

Graf 4.11.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na poloměru tunelu $R [\text{m}]$



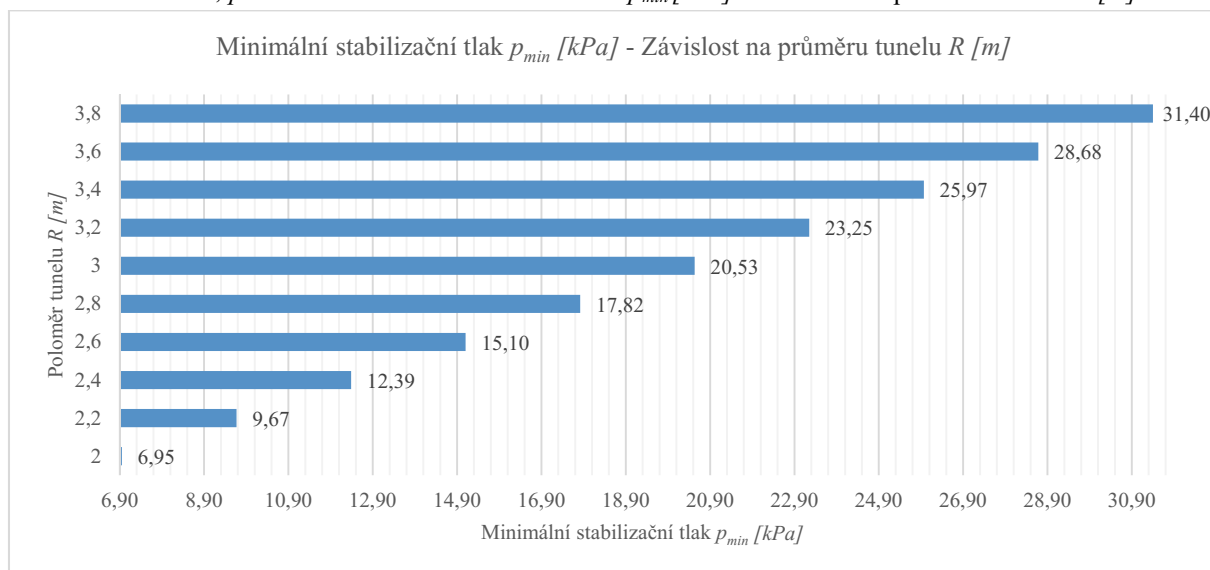
Půlkruh

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.3. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Soudržnost zeminy byla volena v rozsahu $c = 6 \sim 15 \text{ kPa}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$.

Tabulka 4.12.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
6,95	2	19	6	25
9,67	2,2	19	6	25
12,39	2,4	19	6	25
15,10	2,6	19	6	25
17,82	2,8	19	6	25
20,53	3	19	6	25
23,25	3,2	19	6	25
25,97	3,4	19	6	25
28,68	3,6	19	6	25
31,40	3,8	19	6	25

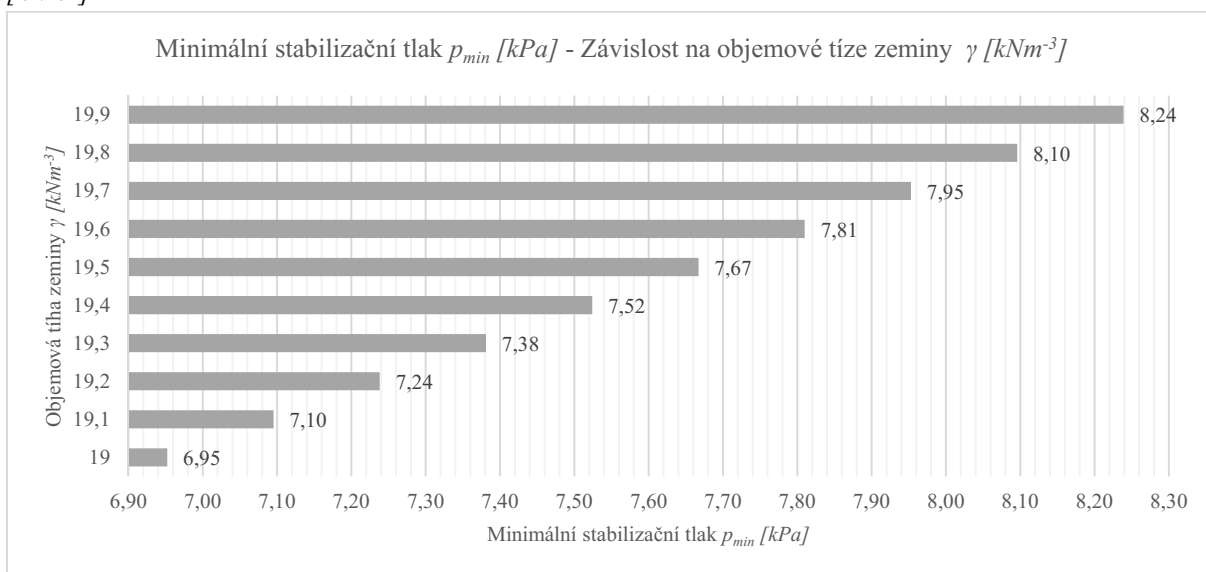
Graf 4.12.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.13.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
6,95	2	19	6	25
7,10	2	19,1	6	25
7,24	2	19,2	6	25
7,38	2	19,3	6	25
7,52	2	19,4	6	25
7,67	2	19,5	6	25
7,81	2	19,6	6	25
7,95	2	19,7	6	25
8,10	2	19,8	6	25
8,24	2	19,9	6	25

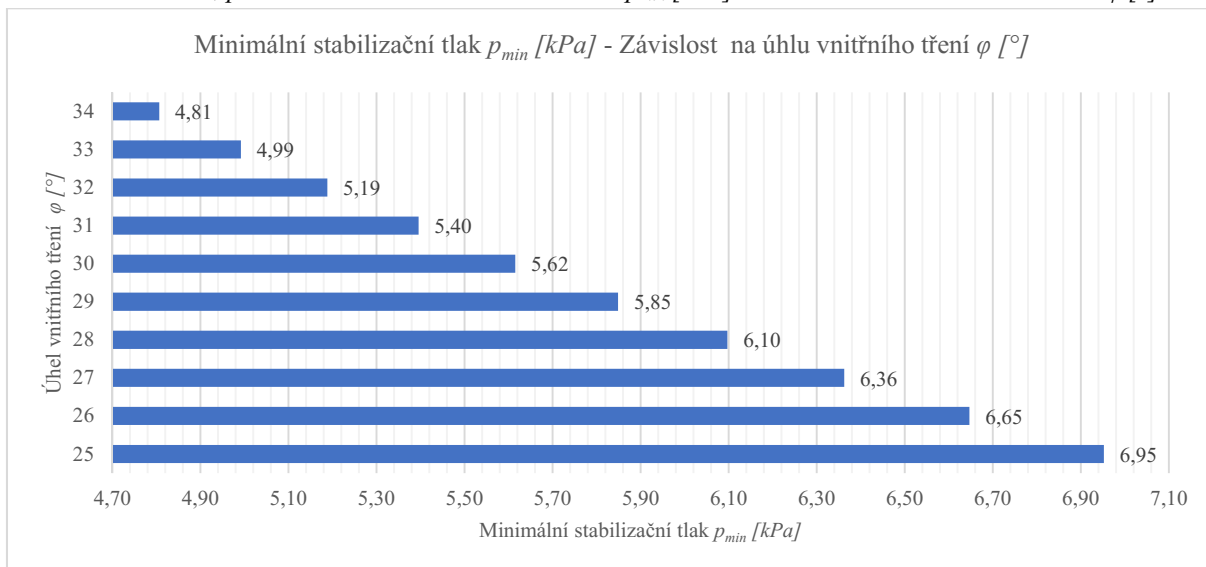
Graf 4.13.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.14.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Obejmová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]
6,95	2	19	6	25
6,65	2	19	6	26
6,36	2	19	6	27
6,10	2	19	6	28
5,85	2	19	6	29
5,62	2	19	6	30
5,40	2	19	6	31
5,19	2	19	6	32
4,99	2	19	6	33
4,81	2	19	6	34

Graf 4.14.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



Jancsecz & Steiner

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.6. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Výška nadloží byla volena v rozsahu $C = 3 \sim 12 \text{ m}$. Výška hladiny podzemní vody byla volena v rozsahu $H = 5 \sim 5,9 \text{ m}$. Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody byla volena v rozsahu $\gamma_{su} = 10,5 \sim 11,4 \text{ kNm}^{-3}$. Objemová tíha vysušené zeminy byla volena v rozsahu $\gamma_d = 17,5 \sim 18,4 \text{ kNm}^{-3}$. Přetížení na povrchu bylo voleno v rozsahu $q_s = 0 \sim 45 \text{ kPa}$. Soudržnost zeminy byla volena v rozsahu $c = 6 \sim 15 \text{ kPa}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Vzorce pro pomocné výpočty jsou uvedeny v teoretické části této práce.

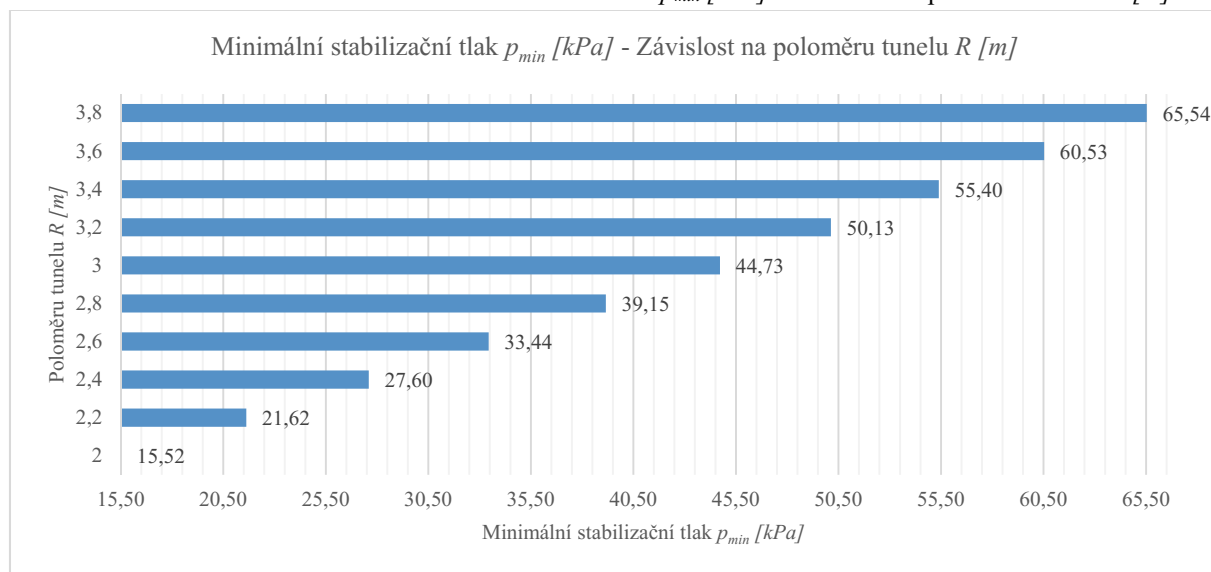
Tabulka 4.15.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na poloměru tunelu $R [\text{m}]$

Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$	Poloměr tunelu $R [\text{m}]$	Výška nadloží $C [\text{m}]$	Výška hladiny podzemní vody $H [\text{m}]$	Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody $\gamma_{su} [\text{kNm}^{-3}]$	Objemová tíha vysušené zeminy $\gamma_d [\text{kNm}^{-3}]$	Přetížení na povrchu $q_s [\text{kPa}]$	Soudržnost $c [\text{kPa}]$	Úhel vnitřního tření $\varphi [^\circ]$	Šířka klínu $B [\text{m}]$
15,52	2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2
21,62	2,2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2,2
27,60	2,4	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2,4
33,44	2,6	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2,6
39,15	2,8	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2,8
44,73	3	12	5	10,5	17,5	45	6	25	3,0
50,13	3,2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	3,2
55,40	3,4	12	5	10,5	17,5	45	6	25	3,4
60,53	3,6	12	5	10,5	17,5	45	6	25	3,6
65,54	3,8	12	5	10,5	17,5	45	6	25	3,8

Tabulka 4.16.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.15

Koeficient zemního tlaku K_{A3}	Úhel skluzu $\beta [^\circ]$	Síla, kterou působí zeminy $E [\text{kN}]$	Síla vyvolaná hmotností klenby $G_s [\text{kN}]$	Síla vyvolaná hmotností klínu $G_w [\text{kN}]$	Smyková pevnost $T [\text{kN}]$	Normálová síla $K [\text{kN}]$	Podmínky pro suchou zeminu $\sigma'_v [\text{kPa}]$	Podmínky pro zeminu pod hladinou podzemní vody $\sigma'_v [\text{kPa}]$	Svislí tlak zeminy v suchu $\sigma'_{vd} [\text{kPa}]$	Součinitel aktivního tlaku K_a
0,271	64,592	48,752	147,781	79,801	32,722	53,140	38,889	20,661	39,497	0,637
0,272	64,557	82,187	205,478	106,382	42,452	64,318	44,618	25,415	44,662	0,637
0,272	64,528	124,851	275,553	138,294	53,903	76,562	50,211	30,136	49,522	0,637
0,272	64,503	177,564	358,819	176,023	67,178	89,873	55,650	34,790	54,085	0,637
0,273	64,482	241,090	455,989	220,057	82,365	104,249	60,921	39,350	58,363	0,637
0,273	64,464	316,147	567,686	270,883	99,545	119,692	66,014	43,799	62,374	0,637
0,274	64,426	403,161	695,137	329,310	119,014	136,226	70,926	48,124	66,135	0,637
0,274	64,393	502,951	838,321	395,587	140,666	153,830	75,655	52,317	69,663	0,637
0,275	64,363	616,122	997,666	470,208	164,558	172,502	80,202	56,372	72,975	0,637
0,276	64,336	743,256	1173,551	553,668	190,742	192,244	84,572	60,288	76,088	0,637

Graf 4.15.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



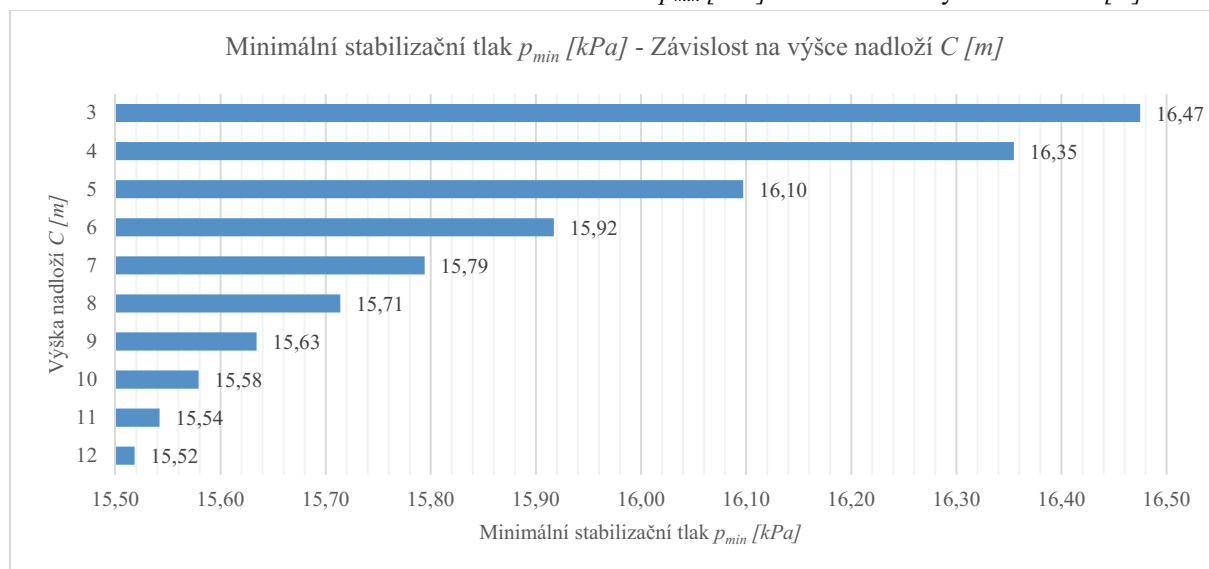
Tabulka 4.17.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Výška nadloží C [m]	Výška hladiny podzemní vody H [m]	Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody γ_{su} [kNm ⁻³]	Objemová tíha vysušené zeminy γ_d [kNm ⁻³]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Šířka klínu B [m]
15,52	2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,54	2	11	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,58	2	10	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,63	2	9	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,71	2	8	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,79	2	7	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,92	2	6	5	10,5	17,5	45	6	25	2
16,10	2	5	5	10,5	17,5	45	6	25	2
16,35	2	4	5	10,5	17,5	45	6	25	2
16,47	2	3	5	10,5	17,5	45	6	25	2

Tabulka 4.18.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.17

Koeficient zemního tlaku K_{A3}	Úhel skluzu β [°]	Síla, kterou působí zeminy E [kN]	Síla vyvolaná hmotností klenby G_s [kN]	Síla vyvolaná hmotností klínu G_w [kN]	Smyková pevnost T [kN]	Normálová síla K [kN]	Podmínky pro suchou zeminu σ'_v [kPa]	Podmínky pro zeminu pod hladinou podzemní vody $-\sigma'_v$ [kPa]	Svislý tlak zeminy v suchu σ'_{vd} [kPa]	Součinitel aktivního tlaku K_a
0,271	64,592	48,752	147,781	79,801	32,722	53,140	38,889	20,661	39,497	0,637
0,272	64,560	48,827	148,229	79,916	32,817	53,154	38,951	20,723	39,769	0,637
0,272	64,528	48,943	148,758	80,031	32,923	53,168	39,034	20,806	40,135	0,637
0,273	64,496	49,117	149,397	80,146	33,043	53,182	39,145	20,917	40,628	0,637
0,273	64,464	49,367	150,186	80,262	33,182	53,197	39,295	21,067	41,291	0,637
0,275	64,388	49,619	151,471	80,534	33,451	53,230	39,497	21,269	42,183	0,637
0,276	64,313	50,005	153,032	80,808	33,756	53,264	39,769	21,541	43,384	0,637
0,278	64,237	50,571	154,963	81,081	34,111	53,298	40,135	21,907	45,000	0,637
0,279	64,161	51,380	157,395	81,355	34,534	53,332	40,628	22,400	47,175	0,637
0,287	63,774	51,757	162,730	82,763	35,800	53,508	41,291	23,063	50,103	0,637

Graf 4.16.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m]



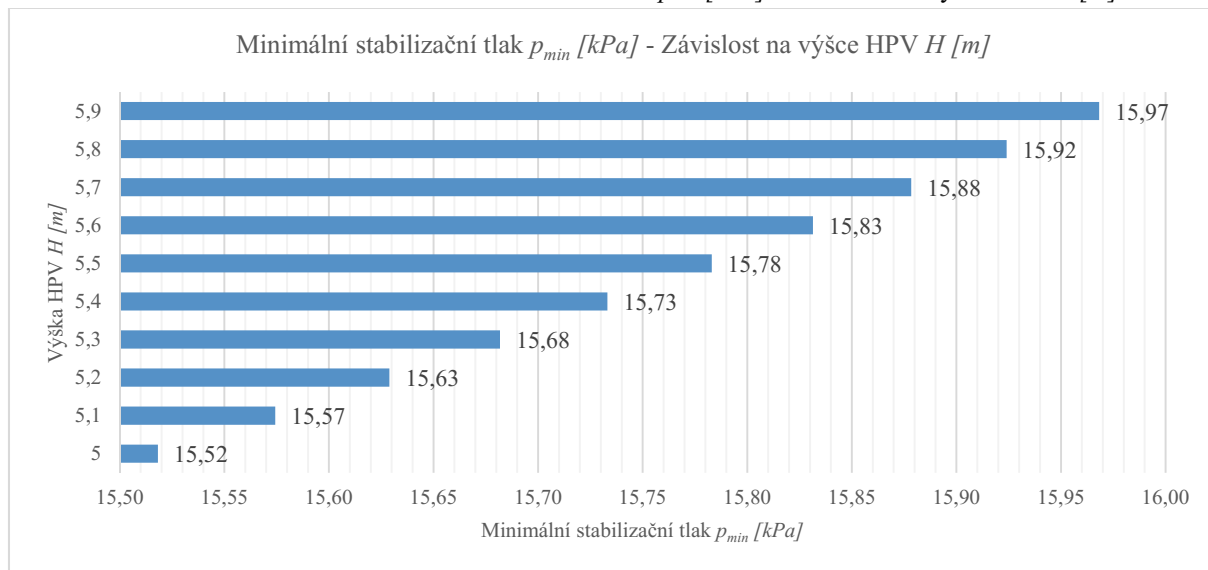
Tabulka 4.19.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce HPV H [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Výška nadloží C [m]	Výška hladiny podzemní vody H [m]	Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody γ_{su} [kNm ⁻³]	Objemová tíha vysušené zeminy γ_d [kNm ⁻³]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Šířka klínu B [m]
15,52	2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,57	2	12	5,1	10,5	17,5	45	6	25	2
15,63	2	12	5,2	10,5	17,5	45	6	25	2
15,68	2	12	5,3	10,5	17,5	45	6	25	2
15,73	2	12	5,4	10,5	17,5	45	6	25	2
15,78	2	12	5,5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,83	2	12	5,6	10,5	17,5	45	6	25	2
15,88	2	12	5,7	10,5	17,5	45	6	25	2
15,92	2	12	5,8	10,5	17,5	45	6	25	2
15,97	2	12	5,9	10,5	17,5	45	6	25	2

Tabulka 4.20.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.19

Koeficient zemního tlaku K_{A3}	Úhel skluzu β [°]	Síla, kterou působí zeminy E [kN]	Síla vyvolaná hmotností klenby G_s [kN]	Síla vyvolaná hmotností klínu G_w [kN]	Smyková pevnost T [kN]	Normálová síla K [kN]	Podmínky pro suchou zeminu σ'_v [kPa]	Podmínky pro zeminu pod hladinou podzemní vody $-\sigma'_v$ [kPa]	Svislý tlak zeminy v suchu σ'_{vd} [kPa]	Součinitel aktivního tlaku K_a
0,271	64,592	48,752	147,781	79,801	32,722	53,140	38,889	20,661	39,497	0,637
0,271	64,592	48,928	147,781	79,801	32,647	53,140	38,889	20,505	39,521	0,637
0,271	64,592	49,100	147,781	79,801	32,574	53,140	38,889	20,353	39,545	0,637
0,271	64,592	49,266	147,781	79,801	32,504	53,140	38,889	20,206	39,571	0,637
0,271	64,592	49,427	147,781	79,801	32,435	53,140	38,889	20,063	39,597	0,637
0,271	64,592	49,584	147,781	79,801	32,368	53,140	38,889	19,925	39,623	0,637
0,271	64,592	49,736	147,781	79,801	32,304	53,140	38,889	19,790	39,651	0,637
0,271	64,592	49,883	147,781	79,801	32,241	53,140	38,889	19,659	39,679	0,637
0,271	64,592	50,027	147,781	79,801	32,180	53,140	38,889	19,533	39,708	0,637
0,271	64,592	50,166	147,781	79,801	32,121	53,140	38,889	19,409	39,738	0,637

Graf 4.17.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce HPV H [m]



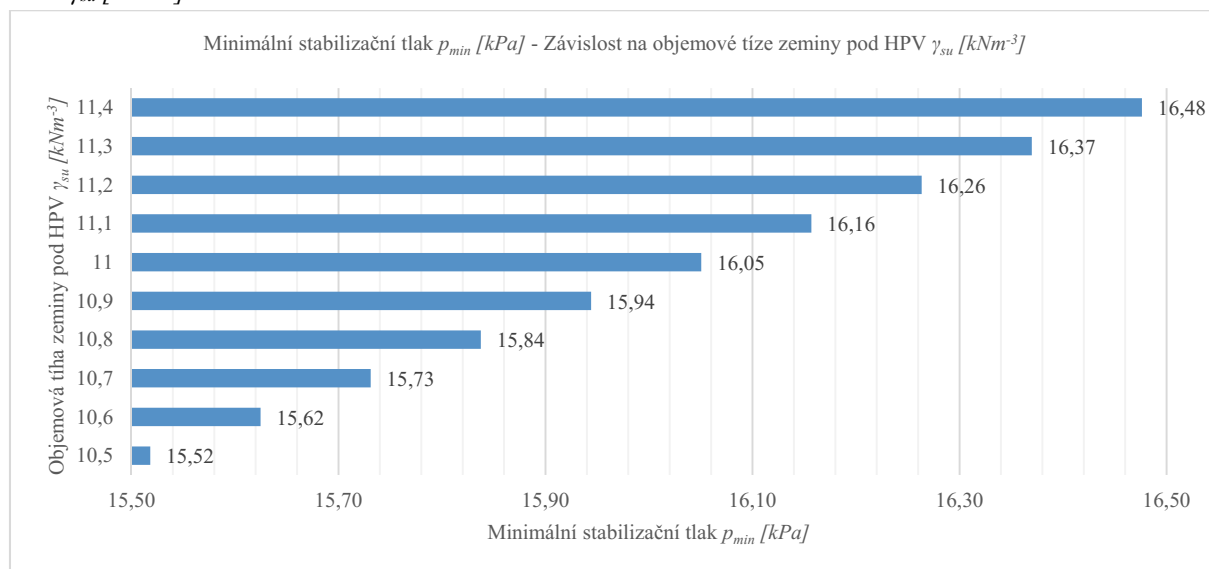
Tabulka 4.21.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy pod HPV γ_{su} [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Výška nadloží C [m]	Výška hladiny podzemní vody H [m]	Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody γ_{su} [kNm ⁻³]	Objemová tíha vysušené zeminy γ_d [kNm ⁻³]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Šířka klínu B [m]
15,52	2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,62	2	12	5	10,6	17,5	45	6	25	2
15,73	2	12	5	10,7	17,5	45	6	25	2
15,84	2	12	5	10,8	17,5	45	6	25	2
15,94	2	12	5	10,9	17,5	45	6	25	2
16,05	2	12	5	11	17,5	45	6	25	2
16,16	2	12	5	11,1	17,5	45	6	25	2
16,26	2	12	5	11,2	17,5	45	6	25	2
16,37	2	12	5	11,3	17,5	45	6	25	2
16,48	2	12	5	11,4	17,5	45	6	25	2

Tabulka 4.22.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.21

Koeficient zemního tlaku K_{A3}	Úhel skluzu β [°]	Síla, kterou působí zeminy E [kN]	Síla vyvolaná hmotností klenby G_s [kN]	Síla vyvolaná hmotností klínu G_w [kN]	Smyková pevnost T [kN]	Normálová síla K [kN]	Podmínky pro suchou zeminu σ'_v [kPa]	Podmínky pro zeminu pod hladinou podzemní vody σ'_v [kPa]	Svislý tlak zeminy v suchu σ'_{vd} [kPa]	Součinitel aktivního tlaku K_a
0,271	64,592	48,752	147,781	79,801	32,722	53,140	38,889	20,661	39,497	0,637
0,271	64,592	49,086	147,781	80,561	32,847	53,140	38,889	20,922	39,497	0,637
0,271	64,592	49,421	147,781	81,321	32,972	53,140	38,889	21,182	39,497	0,637
0,271	64,592	49,755	147,781	82,081	33,097	53,140	38,889	21,442	39,497	0,637
0,271	64,592	50,090	147,781	82,841	33,222	53,140	38,889	21,703	39,497	0,637
0,271	64,592	50,424	147,781	83,601	33,347	53,140	38,889	21,963	39,497	0,637
0,271	64,592	50,758	147,781	84,361	33,472	53,140	38,889	22,224	39,497	0,637
0,271	64,592	51,093	147,781	85,121	33,597	53,140	38,889	22,484	39,497	0,637
0,271	64,592	51,427	147,781	85,881	33,722	53,140	38,889	22,744	39,497	0,637
0,271	64,592	51,762	147,781	86,641	33,847	53,140	38,889	23,005	39,497	0,637

Graf 4.18.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy pod HPV γ_{su} [kNm⁻³]



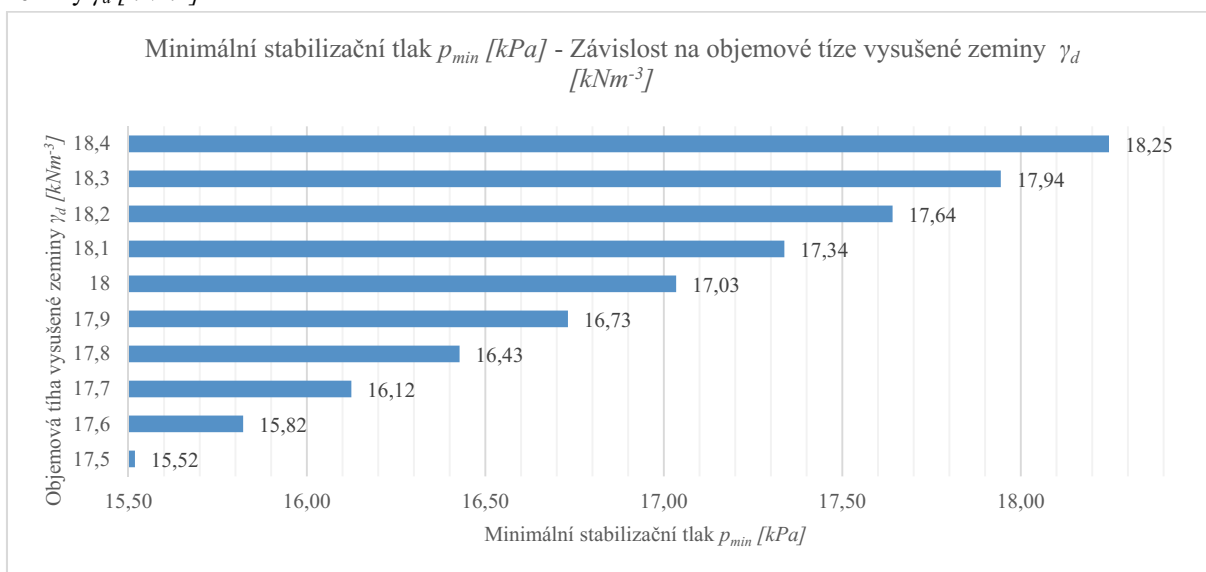
Tabulka 4.23.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze vysušené zeminy γ_d [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Výška nadloží C [m]	Výška hladiny podzemní vody H [m]	Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody γ_{su} [kNm ⁻³]	Objemová tíha vysušené zeminy γ_d [kNm ⁻³]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Šířka klínu B [m]
15,52	2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,82	2	12	5	10,5	17,6	45	6	25	2
16,12	2	12	5	10,5	17,7	45	6	25	2
16,43	2	12	5	10,5	17,8	45	6	25	2
16,73	2	12	5	10,5	17,9	45	6	25	2
17,03	2	12	5	10,5	18	45	6	25	2
17,34	2	12	5	10,5	18,1	45	6	25	2
17,64	2	12	5	10,5	18,2	45	6	25	2
17,94	2	12	5	10,5	18,3	45	6	25	2
18,25	2	12	5	10,5	18,4	45	6	25	2

Tabulka 4.24.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.23

Koeficient zemního tlaku K_{A3}	Úhel skluzu β [°]	Síla, kterou působí zeminy E [kN]	Síla vyvolaná hmotností klenby G_s [kN]	Síla vyvolaná hmotností klínu G_w [kN]	Smyková pevnost T [kN]	Normálová síla K [kN]	Podmínky pro suchou zeminu σ'_v [kPa]	Podmínky pro zeminu pod hladinou podzemní vody σ'_v [kPa]	Svislý tlak zeminy v suchu σ'_{vd} [kPa]	Součinitel aktivního tlaku K_a
0,271	64,592	48,752	147,781	79,801	32,722	53,140	38,889	20,661	39,497	0,637
0,271	64,592	49,705	149,024	79,801	32,754	53,140	39,216	20,728	39,792	0,637
0,271	64,592	50,657	150,267	79,801	32,786	53,140	39,543	20,795	40,086	0,637
0,271	64,592	51,610	151,510	79,801	32,818	53,140	39,871	20,861	40,381	0,637
0,271	64,592	52,563	152,753	79,801	32,850	53,140	40,198	20,928	40,676	0,637
0,271	64,592	53,515	153,996	79,801	32,882	53,140	40,525	20,995	40,970	0,637
0,271	64,592	54,468	155,239	79,801	32,914	53,140	40,852	21,061	41,265	0,637
0,271	64,592	55,421	156,482	79,801	32,946	53,140	41,179	21,128	41,559	0,637
0,271	64,592	56,373	157,725	79,801	32,978	53,140	41,506	21,195	41,854	0,637
0,271	64,592	57,326	158,968	79,801	33,010	53,140	41,833	21,261	42,148	0,637

Graf 4.19.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze vysušené zeminy γ_d [kNm⁻³]



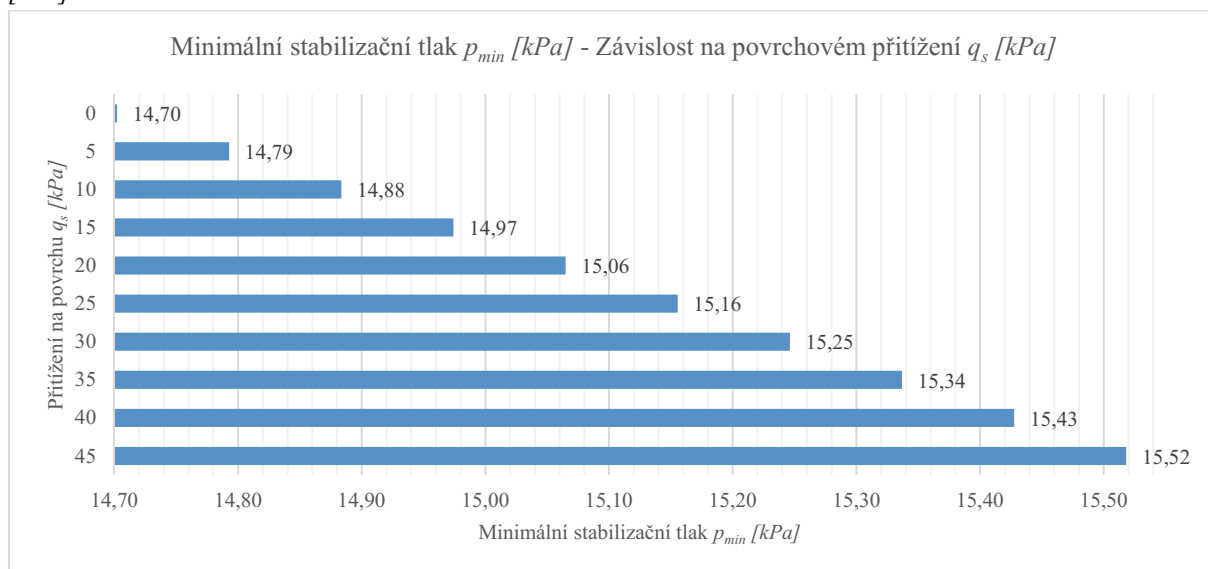
Tabulka 4.25.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přitížení q_s [kPa]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Výška nadloží C [m]	Výška hladiny podzemní vody H [m]	Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody γ_{su} [kNm ⁻³]	Objemová tíha vysušené zeminy γ_d [kNm ⁻³]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Šířka klínu B [m]
15,52	2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2
15,43	2	12	5	10,5	17,5	40	6	25	2
15,34	2	12	5	10,5	17,5	35	6	25	2
15,25	2	12	5	10,5	17,5	30	6	25	2
15,16	2	12	5	10,5	17,5	25	6	25	2
15,06	2	12	5	10,5	17,5	20	6	25	2
14,97	2	12	5	10,5	17,5	15	6	25	2
14,88	2	12	5	10,5	17,5	10	6	25	2
14,79	2	12	5	10,5	17,5	5	6	25	2
14,70	2	12	5	10,5	17,5	0	6	25	2

Tabulka 4.26.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.25

Koeficient zemního tlaku K_{a3}	Úhel skluzu β [°]	Síla, kterou působí zeminy E [kN]	Síla vyvolaná hmotností klenby G_s [kN]	Síla vyvolaná hmotností klínu G_w [kN]	Smyková pevnost T [kN]	Normálová síla K [kN]	Podmínky pro suchou zeminu σ'_v [kPa]	Podmínky pro zeminu pod hladinou podzemní vody σ'_v [kPa]	Svislý tlak zeminy v suchu σ'_{vd} [kPa]	Součinitel aktivního tlaku K_a
0,271	64,592	48,752	147,781	79,801	32,722	53,140	38,889	20,661	39,497	0,637
0,271	64,592	48,467	147,243	79,801	32,654	53,140	38,748	20,520	38,872	0,637
0,271	64,592	48,182	146,706	79,801	32,586	53,140	38,606	20,378	38,247	0,637
0,271	64,592	47,897	146,168	79,801	32,518	53,140	38,465	20,237	37,622	0,637
0,271	64,592	47,612	145,630	79,801	32,450	53,140	38,323	20,095	36,997	0,637
0,271	64,592	47,328	145,093	79,801	32,382	53,140	38,182	19,954	36,373	0,637
0,271	64,592	47,043	144,555	79,801	32,314	53,140	38,040	19,812	35,748	0,637
0,271	64,592	46,758	144,017	79,801	32,246	53,140	37,899	19,671	35,123	0,637
0,271	64,592	46,473	143,479	79,801	32,178	53,140	37,757	19,529	34,498	0,637
0,271	64,592	46,188	142,942	79,801	32,110	53,140	37,616	19,388	33,873	0,637

Graf 4.20.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přitížení q_s [kPa]



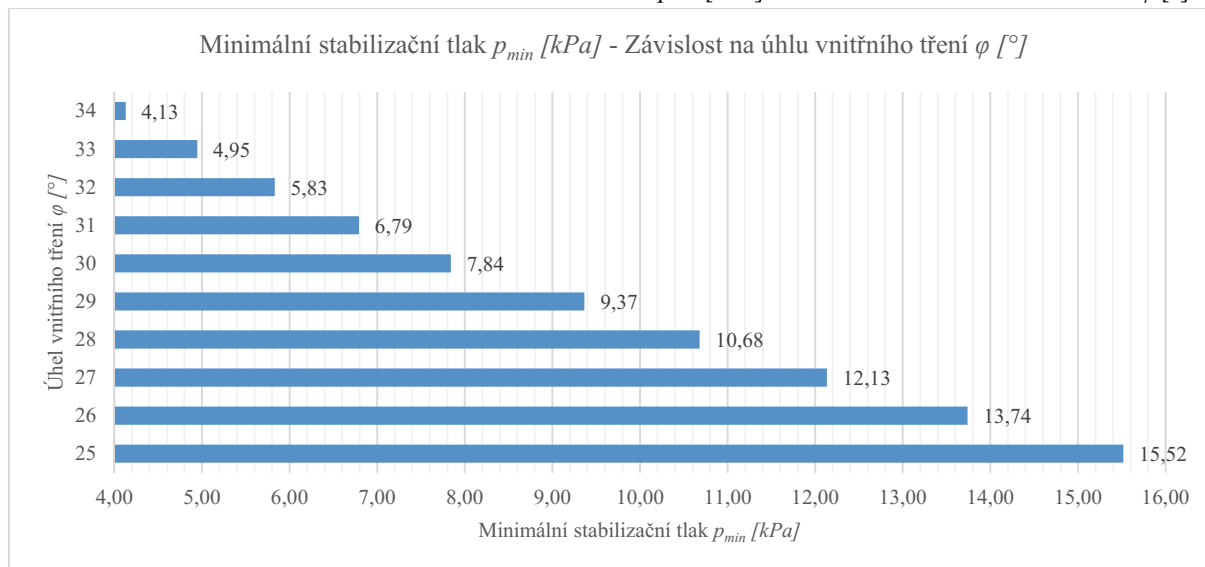
Tabulka 4.27.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Výška nadloží C [m]	Výška hladiny podzemní vody H [m]	Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody γ_{su} [kNm ⁻³]	Objemová tíha vysušené zeminy γ_d [kNm ⁻³]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Šířka klínu B [m]
15,52	2	12	5	10,5	17,5	45	6	25	2
13,74	2	12	5	10,5	17,5	45	6	26	2
12,13	2	12	5	10,5	17,5	45	6	27	2
10,68	2	12	5	10,5	17,5	45	6	28	2
9,37	2	12	5	10,5	17,5	45	6	29	2
7,84	2	12	5	10,5	17,5	45	6	30	2
6,79	2	12	5	10,5	17,5	45	6	31	2
5,83	2	12	5	10,5	17,5	45	6	32	2
4,95	2	12	5	10,5	17,5	45	6	33	2
4,13	2	12	5	10,5	17,5	45	6	34	2

Tabulka 4.28.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.27

Koeficient zemního tlaku K_{A3}	Úhel skluzu β [°]	Síla, kterou působí zeminy E [kN]	Síla vyvolaná hmotností klenby G_s [kN]	Síla vyvolaná hmotností klínu G_w [kN]	Smyková pevnost T [kN]	Normálová síla K [kN]	Podmínky pro suchou zeminu σ'_v [kPa]	Podmínky pro zeminu pod hladinou podzemní vody σ'_v [kPa]	Svislý tlak zeminy v suchu σ'_{vd} [kPa]	Součinitel aktivního tlaku K_a
0,271	64,592	48,752	147,781	79,801	32,722	53,140	38,889	20,661	39,497	0,637
0,260	65,015	43,166	141,367	78,287	31,788	52,956	37,921	19,957	38,594	0,625
0,248	65,438	38,120	135,371	76,783	30,867	52,776	37,024	19,310	37,749	0,613
0,237	65,860	33,556	129,750	75,289	29,959	52,600	36,190	18,715	36,958	0,601
0,225	66,283	29,423	124,468	73,806	29,064	52,428	35,415	18,166	36,215	0,589
0,214	64,592	24,633	131,832	79,801	31,091	53,140	34,692	17,659	35,518	0,577
0,205	65,410	21,339	124,537	76,880	29,732	52,787	34,017	17,189	34,863	0,566
0,197	66,228	18,317	117,643	73,997	28,402	52,450	33,386	16,753	34,246	0,554
0,188	67,047	15,536	111,113	71,151	27,098	52,127	32,795	16,348	33,664	0,543
0,180	67,865	12,970	104,916	68,338	25,821	51,819	32,240	15,970	33,116	0,532

Graf 4.21.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



Vermeer & Ruse

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 4.1 [6]:

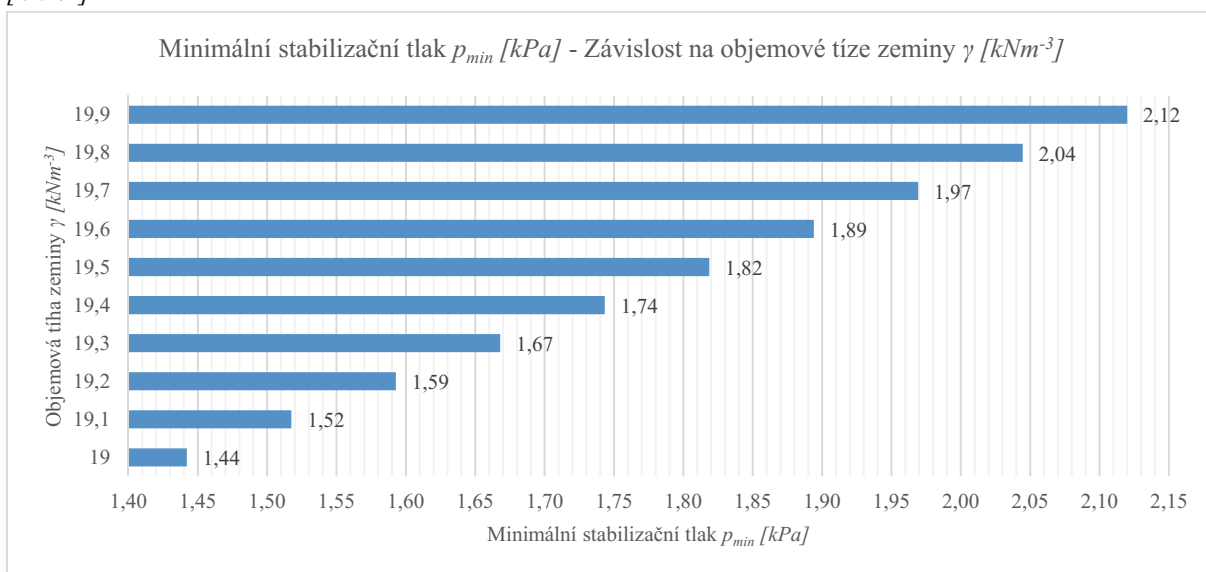
$$p = -\frac{c}{\tan(\varphi)} + 2 * \gamma * R * \left(\frac{1}{9 * \tan(\varphi)} - 0,05 \right). \quad (4.1.)$$

V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Soudržnost zeminy byla volena v rozsahu $c = 6 \sim 15 \text{ kPa}$.

Tabulka 4.29.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Soudržnost c [kPa]
1,44	19	2	25	6
1,52	19,1	2	25	6
1,59	19,2	2	25	6
1,67	19,3	2	25	6
1,74	19,4	2	25	6
1,82	19,5	2	25	6
1,89	19,6	2	25	6
1,97	19,7	2	25	6
2,04	19,8	2	25	6
2,12	19,9	2	25	6

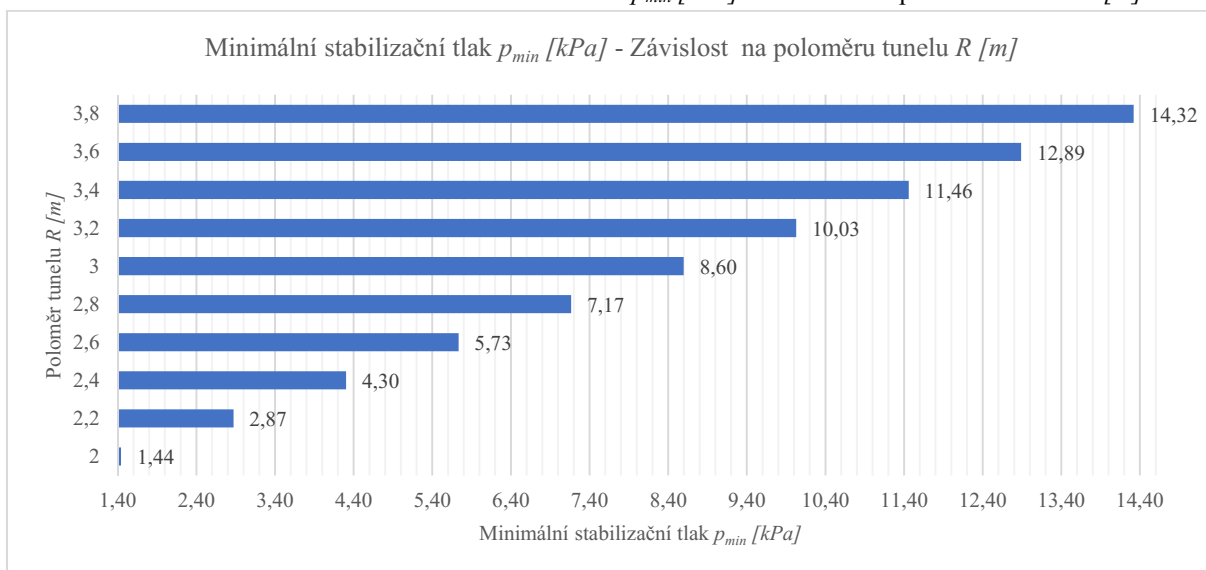
Graf 4.22.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.30.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]	Soudržnost c [kPa]
1,44	19	2	25	6
2,87	19	2,2	25	6
4,30	19	2,4	25	6
5,73	19	2,6	25	6
7,17	19	2,8	25	6
8,60	19	3	25	6
10,03	19	3,2	25	6
11,46	19	3,4	25	6
12,89	19	3,6	25	6
14,32	19	3,8	25	6

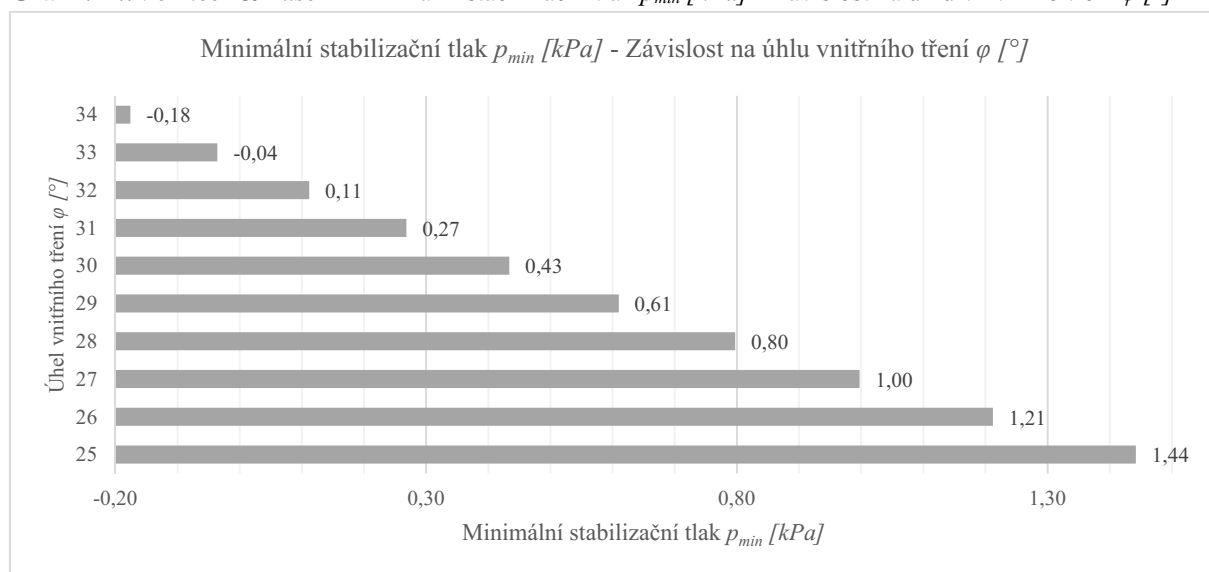
Graf 4.23.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.31.: *Vermeer & Ruse* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Soudržnost c [kPa]
1,44	19	2	25	6
1,21	19	2	26	6
1,00	19	2	27	6
0,80	19	2	28	6
0,61	19	2	29	6
0,43	19	2	30	6
0,27	19	2	31	6
0,11	19	2	32	6
-0,04	19	2	33	6
-0,18	19	2	34	6

Graf 4.24.: *Vermeer & Ruse* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



4.2. Nesoudržné zeminy

Atkinson & Potts

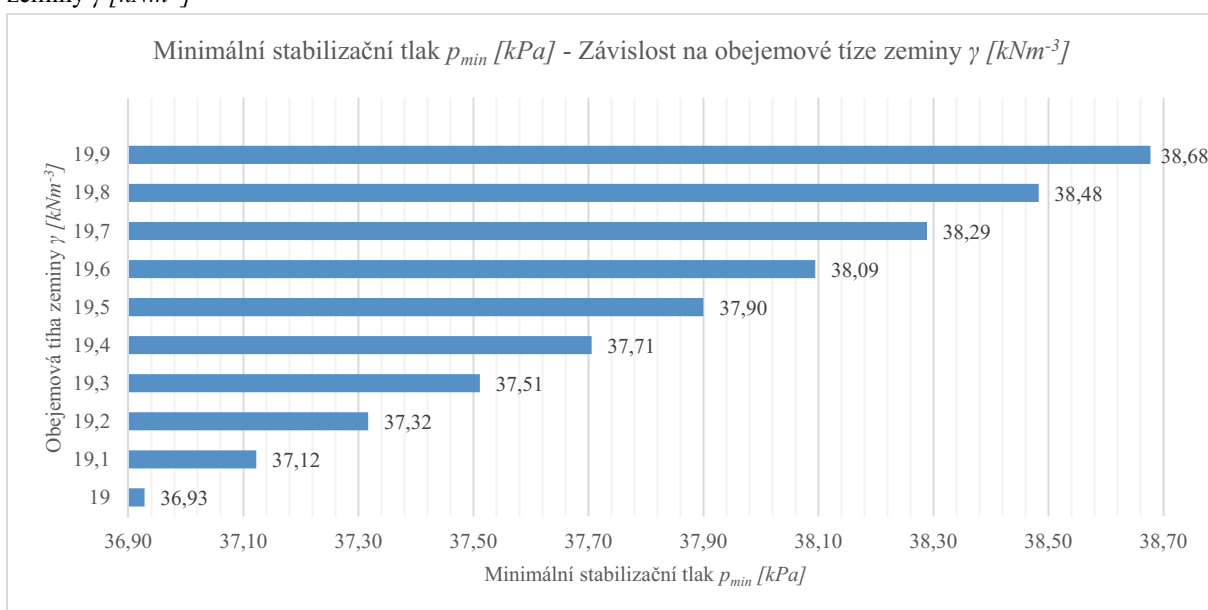
Lower bound

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.19. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Součinitel pasivního tlaku k_p byl počítán pomocí vzorce 2.20.

Tabulka 4.32.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]	Součinitel pasivního tlaku K_p [m]
36,93	19	2	25	2,46
37,12	19,1	2	25	2,46
37,32	19,2	2	25	2,46
37,51	19,3	2	25	2,46
37,71	19,4	2	25	2,46
37,90	19,5	2	25	2,46
38,09	19,6	2	25	2,46
38,29	19,7	2	25	2,46
38,48	19,8	2	25	2,46
38,68	19,9	2	25	2,46

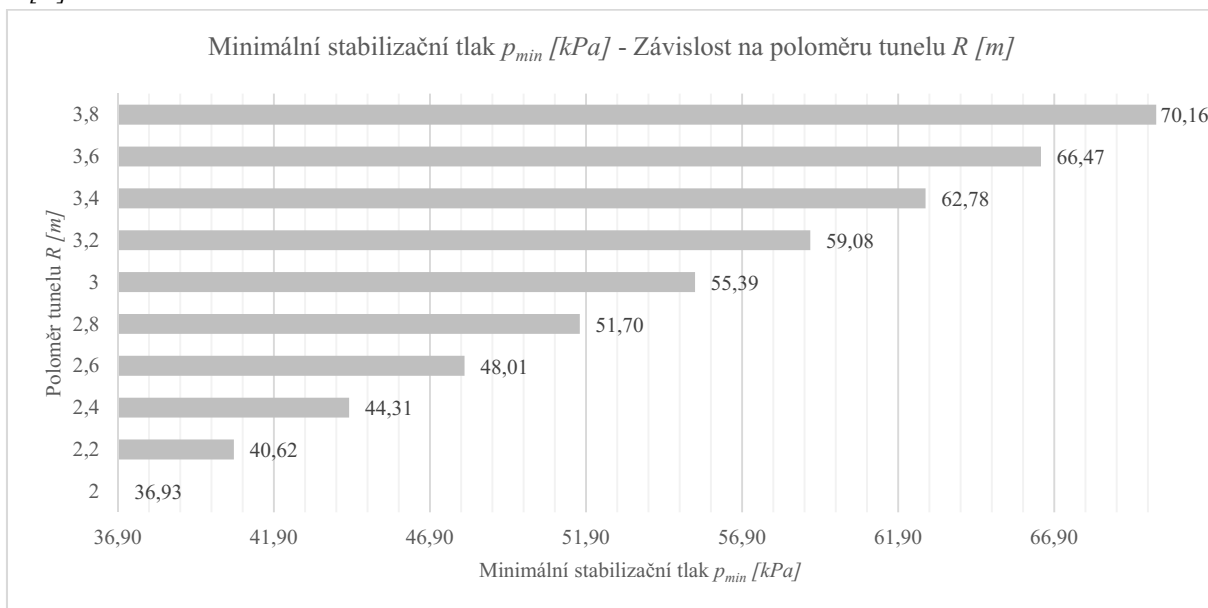
Graf 4.25.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.33.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]	Součinitel pasivního tlaku K_p [m]
36,93	19	2	25	2,46
40,62	19	2,2	25	2,46
44,31	19	2,4	25	2,46
48,01	19	2,6	25	2,46
51,70	19	2,8	25	2,46
55,39	19	3	25	2,46
59,08	19	3,2	25	2,46
62,78	19	3,4	25	2,46
66,47	19	3,6	25	2,46
70,16	19	3,8	25	2,46

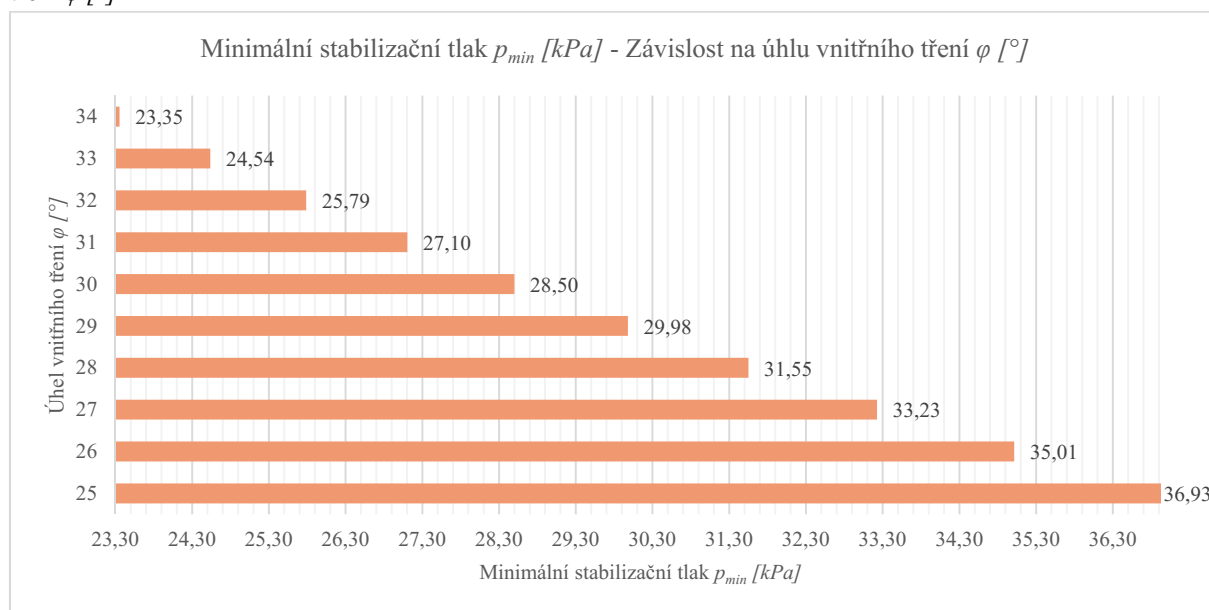
Graf 4.26.: *Atkinson & Potts, lower bound* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.34.: *Atkinson & Potts, lower bound* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Součinitel pasivního tlaku K_p [m]
36,93	19	2	25	2,46
35,01	19	2	26	2,56
33,23	19	2	27	2,66
31,55	19	2	28	2,77
29,98	19	2	29	2,88
28,50	19	2	30	3,00
27,10	19	2	31	3,12
25,79	19	2	32	3,25
24,54	19	2	33	3,39
23,35	19	2	34	3,54

Graf 4.27.: *Atkinson & Potts, lower bound* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



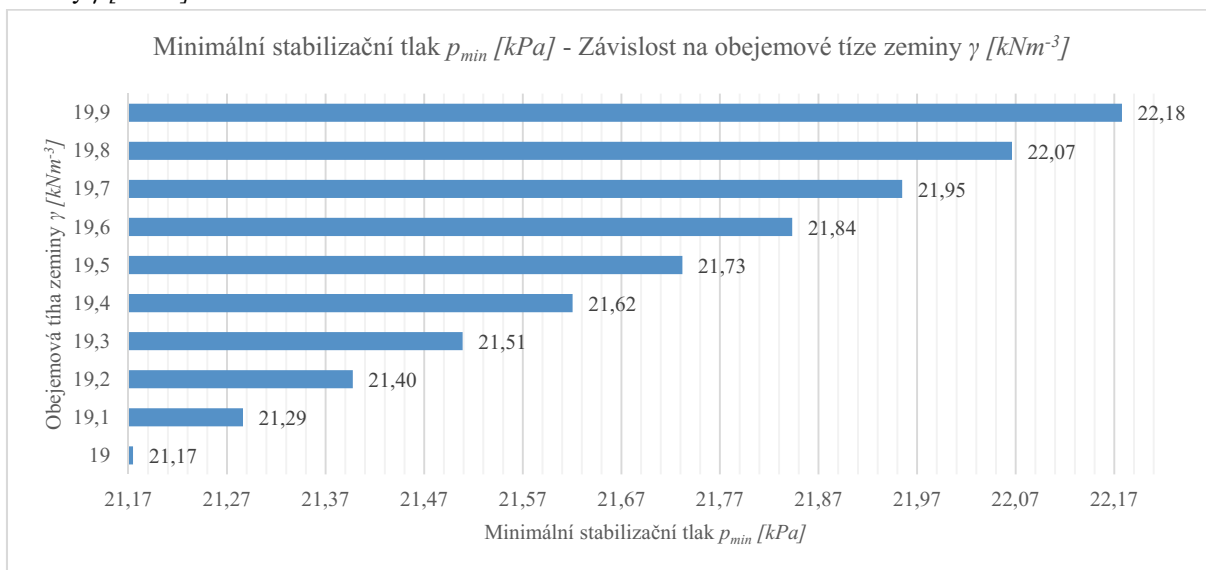
Upper bound

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.21. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$.

Tabulka 4.35.: *Atkinson & Potts, upper bound* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření φ [°]
21,17	19	2	25
21,29	19,1	2	25
21,40	19,2	2	25
21,51	19,3	2	25
21,62	19,4	2	25
21,73	19,5	2	25
21,84	19,6	2	25
21,95	19,7	2	25
22,07	19,8	2	25
22,18	19,9	2	25

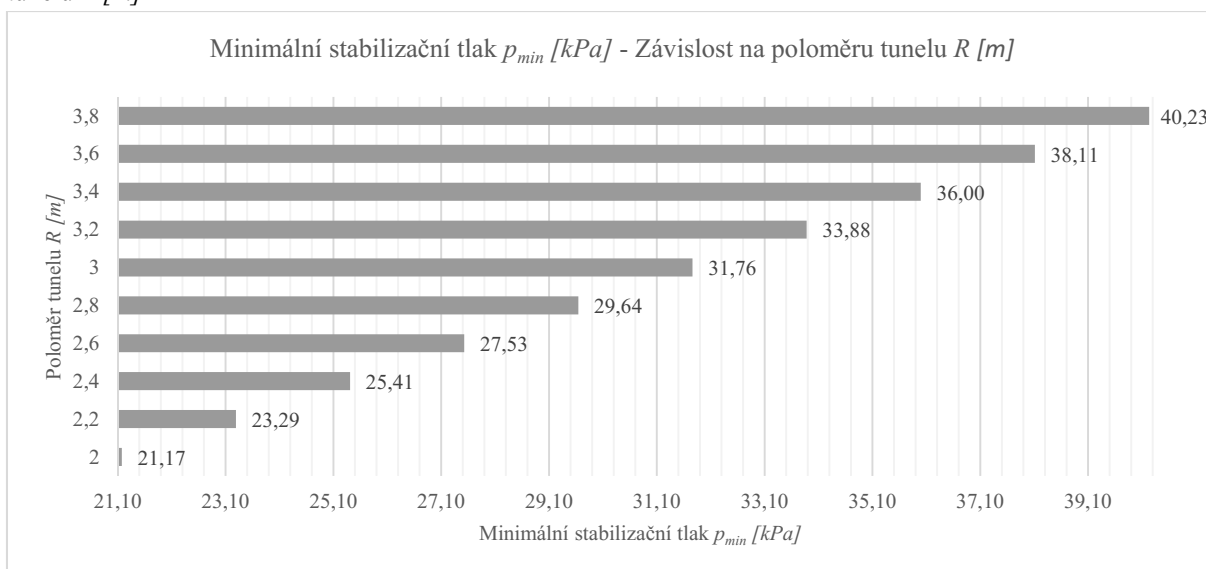
Graf 4.28.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.36.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
21,17	19	2	25
23,29	19	2,2	25
25,41	19	2,4	25
27,53	19	2,6	25
29,64	19	2,8	25
31,76	19	3	25
33,88	19	3,2	25
36,00	19	3,4	25
38,11	19	3,6	25
40,23	19	3,8	25

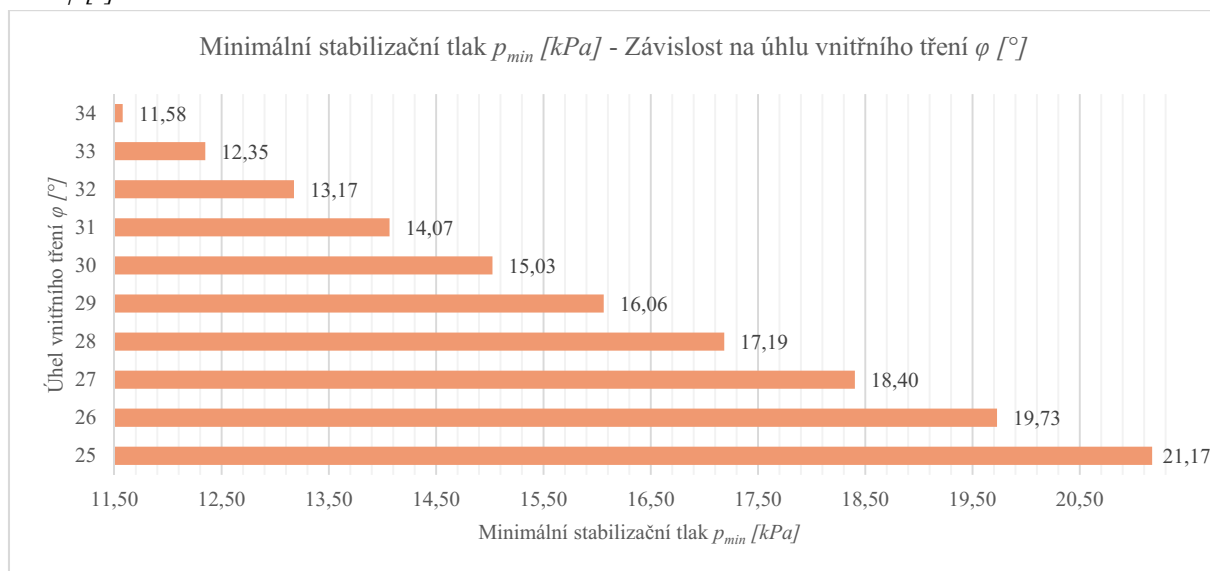
Graf 4.29.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.37.: *Atkinson & Potts, upper bound* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření φ [°]
21,17	19	2	25
19,73	19	2	26
18,40	19	2	27
17,19	19	2	28
16,06	19	2	29
15,03	19	2	30
14,07	19	2	31
13,17	19	2	32
12,35	19	2	33
11,58	19	2	34

Graf 4.30.: *Atkinson & Potts, upper bound* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



Leca & Dormieux

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.54. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Přetížení na povrchu bylo voleno v rozsahu $q_s = 0 \sim 45 \text{ kPa}$.

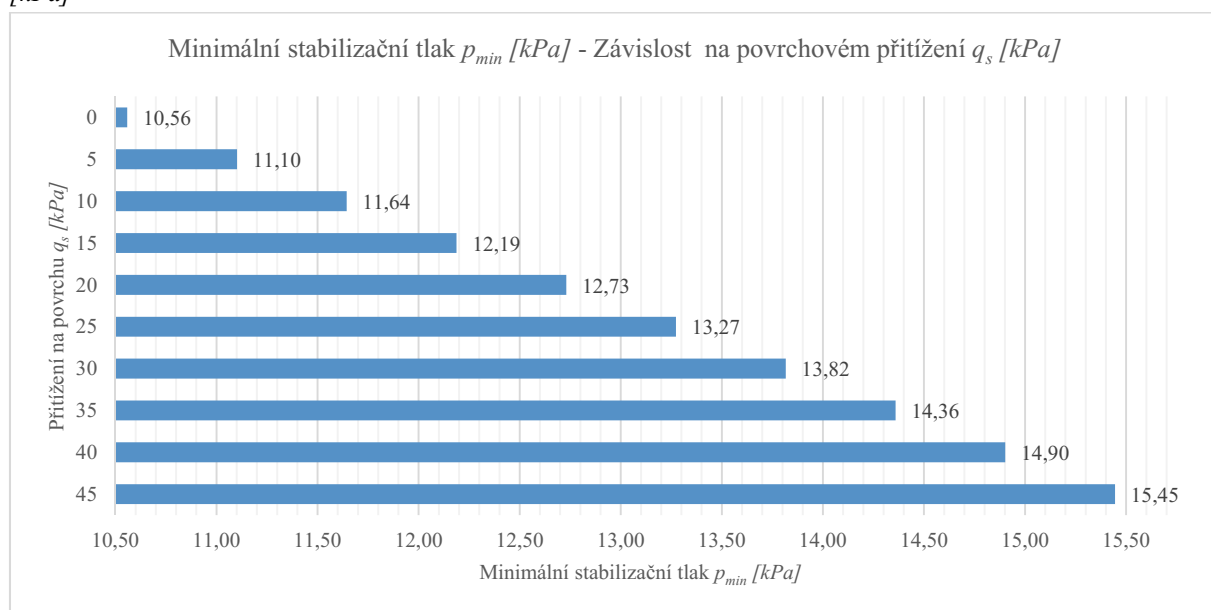
Tabulka 4.38.: *Leca & Dormieux* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přitížení q_s [kPa]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]	Pomocný úhel α [°]	Úhel skluzu β [°]
15,45	45	2	19	25	36,5	63,25
14,90	40	2	19	25	36,5	63,25
14,36	35	2	19	25	36,5	63,25
13,82	30	2	19	25	36,5	63,25
13,27	25	2	19	25	36,5	63,25
12,73	20	2	19	25	36,5	63,25
12,19	15	2	19	25	36,5	63,25
11,64	10	2	19	25	36,5	63,25
11,10	5	2	19	25	36,5	63,25
10,56	0	2	19	25	36,5	63,25

Tabulka 4.39.: *Leca & Dormieux* - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.38

Bezrozměrný zatížení N_s	Bezrozměrný faktor N_γ	Geometrický faktor R_A	Geometrický faktor R_B	Geometrický faktor R_C	Geometrický faktor R_D	Geometrický faktor R_E
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296

Graf 4.31.: *Leca & Dormieux* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přitížení q_s [kPa]



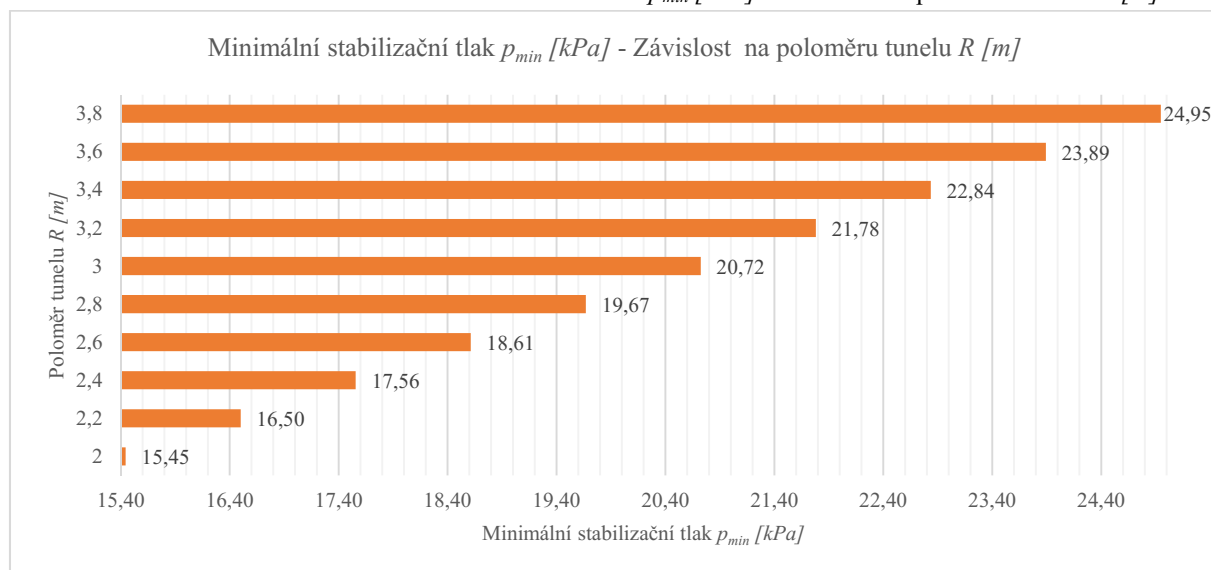
Tabulka 4.40.: *Leca & Dormieux* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]	Pomocný úhel α [°]	Úhel skluzu β [°]
15,45	45	2	19	25	36,5	63,25
16,50	45	2,2	19	25	36,5	63,25
17,56	45	2,4	19	25	36,5	63,25
18,61	45	2,6	19	25	36,5	63,25
19,67	45	2,8	19	25	36,5	63,25
20,72	45	3	19	25	36,5	63,25
21,78	45	3,2	19	25	36,5	63,25
22,84	45	3,4	19	25	36,5	63,25
23,89	45	3,6	19	25	36,5	63,25
24,95	45	3,8	19	25	36,5	63,25

Tabulka 4.41.: *Leca & Dormieux* - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.40

Bezrozměrný zatížení N_s	Bezrozměrný faktor N_γ	Geometrický faktor R_A	Geometrický faktor R_B	Geometrický faktor R_C	Geometrický faktor R_D	Geometrický faktor R_E
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296

Graf 4.32.: *Leca & Dormieux* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



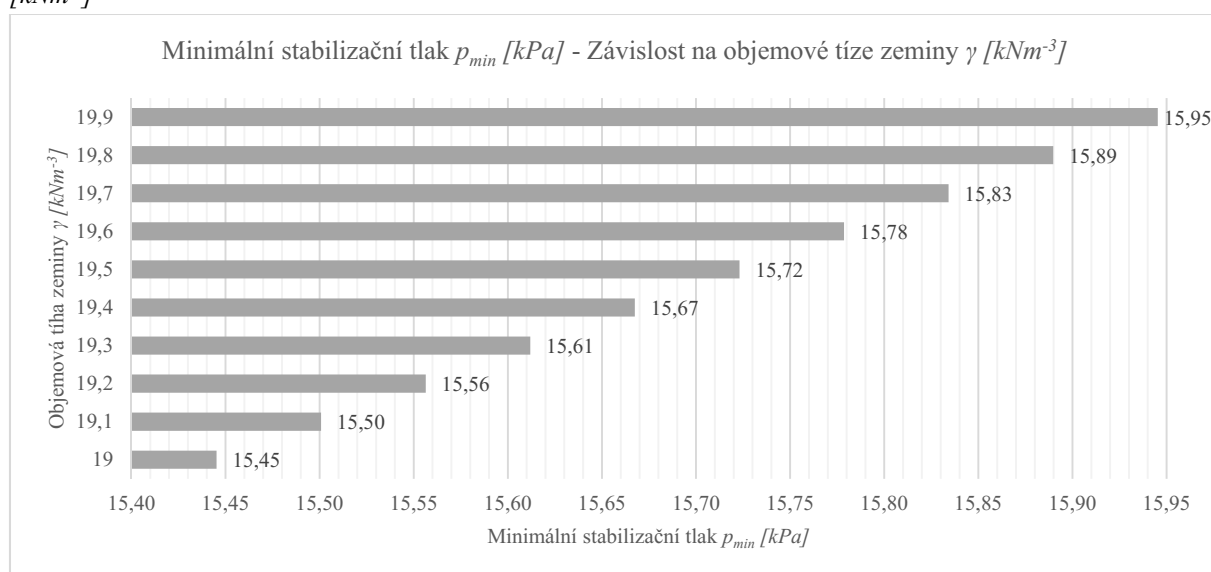
Tabulka 4.42.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]	Pomocný úhel α [°]	Úhel skluzu β [°]
15,45	45	2	19	25	36,5	63,25
15,50	45	2	19,1	25	36,5	63,25
15,56	45	2	19,2	25	36,5	63,25
15,61	45	2	19,3	25	36,5	63,25
15,67	45	2	19,4	25	36,5	63,25
15,72	45	2	19,5	25	36,5	63,25
15,78	45	2	19,6	25	36,5	63,25
15,83	45	2	19,7	25	36,5	63,25
15,89	45	2	19,8	25	36,5	63,25
15,95	45	2	19,9	25	36,5	63,25

Tabulka 4.43.: Leca & Dormieux - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.42

Bezrozměrný zatížení N_s	Bezrozměrný faktor N_γ	Geometrický faktor R_A	Geometrický faktor R_B	Geometrický faktor R_C	Geometrický faktor R_D	Geometrický faktor R_E
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296

Graf 4.33.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



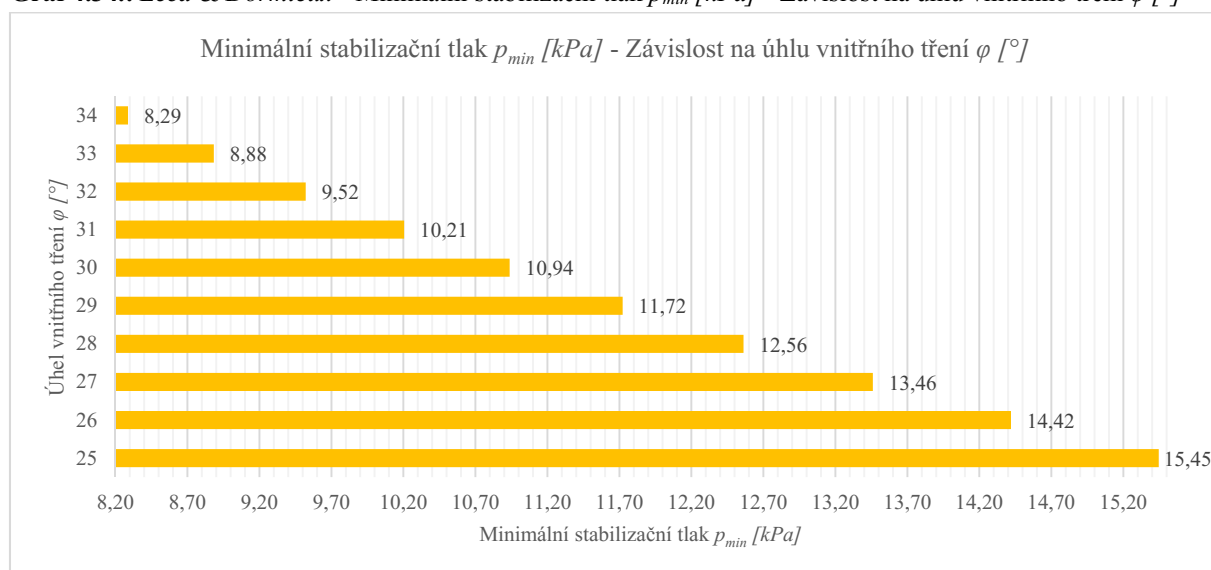
Tabulka 4.44.: *Leca & Dormieux* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Přítížení na povrchu q_s [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Pomocný úhel α [°]	Úhel skluzu β [°]
15,45	45	2	19	25	36,5	63,25
14,42	45	2	19	26	36	63
13,46	45	2	19	27	35,5	62,75
12,56	45	2	19	28	35	62,5
11,72	45	2	19	29	34,5	62,25
10,94	45	2	19	30	34	62
10,21	45	2	19	31	33,5	61,75
9,52	45	2	19	32	33	61,5
8,88	45	2	19	33	32,5	61,25
8,29	45	2	19	34	32	61

Tabulka 4.45.: *Leca & Dormieux* - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.44

Bezrozměrný zatížení N_s	Bezrozměrný faktor N_γ	Geometrický faktor R_A	Geometrický faktor R_B	Geometrický faktor R_C	Geometrický faktor R_D	Geometrický faktor R_E
0,109	0,139	0,754	0,610	0,414	2,114	0,296
0,097	0,132	0,757	0,587	0,405	2,033	0,283
0,087	0,126	0,758	0,564	0,396	1,958	0,270
0,077	0,120	0,760	0,544	0,387	1,889	0,257
0,068	0,114	0,762	0,524	0,378	1,826	0,245
0,060	0,108	0,764	0,505	0,369	1,767	0,232
0,053	0,103	0,765	0,487	0,359	1,712	0,220
0,046	0,098	0,767	0,470	0,350	1,661	0,208
0,040	0,093	0,768	0,454	0,341	1,614	0,197
0,035	0,088	0,769	0,438	0,331	1,570	0,185

Graf 4.34.: *Leca & Dormieux* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



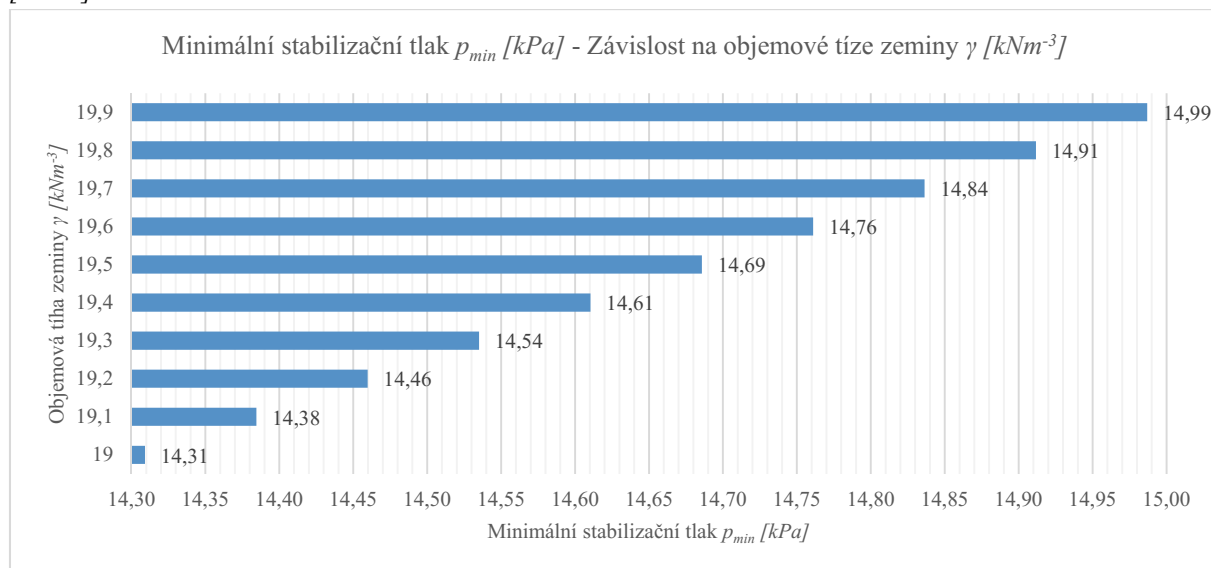
Vermeer & Ruse

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 4.1. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Soudržnost zeminy $c = 0 \text{ kPa}$.

Tabulka 4.46.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na objemové tíze zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$

Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$	Objemová tíha zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$	Poloměr tunelu $R [\text{m}]$	Úhel vnitřního tření $\varphi [^\circ]$
14,31	19	2	25
14,38	19,1	2	25
14,46	19,2	2	25
14,54	19,3	2	25
14,61	19,4	2	25
14,69	19,5	2	25
14,76	19,6	2	25
14,84	19,7	2	25
14,91	19,8	2	25
14,99	19,9	2	25

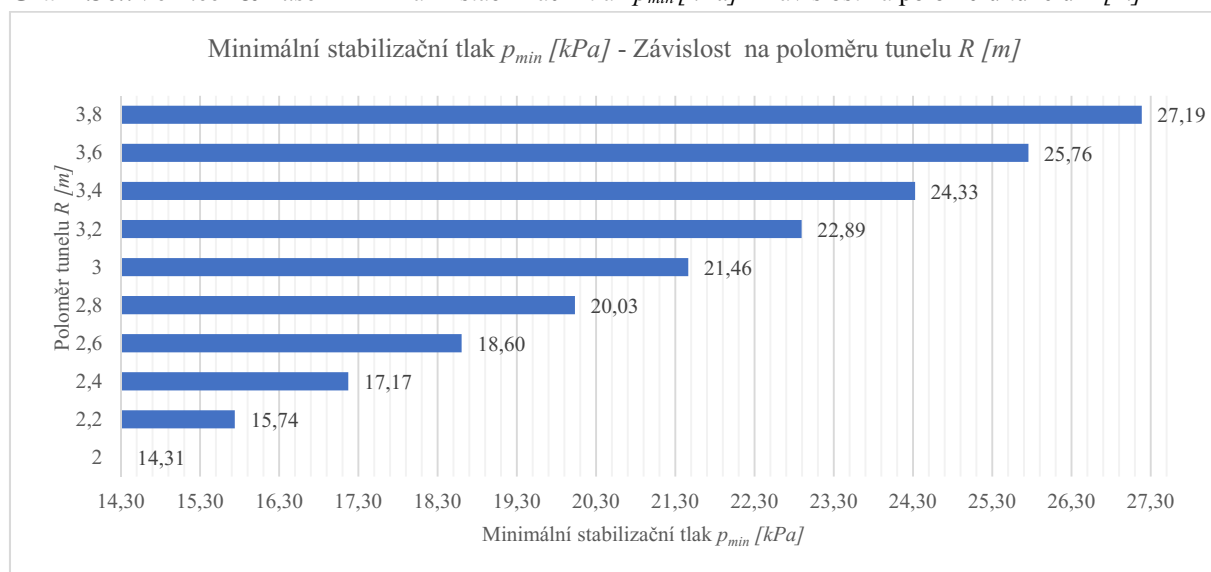
Graf 4.35.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na objemové tíze zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$



Tabulka 4.47.: *Vermeer & Ruse* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
14,31	19	2	25
15,74	19	2,2	25
17,17	19	2,4	25
18,60	19	2,6	25
20,03	19	2,8	25
21,46	19	3	25
22,89	19	3,2	25
24,33	19	3,4	25
25,76	19	3,6	25
27,19	19	3,8	25

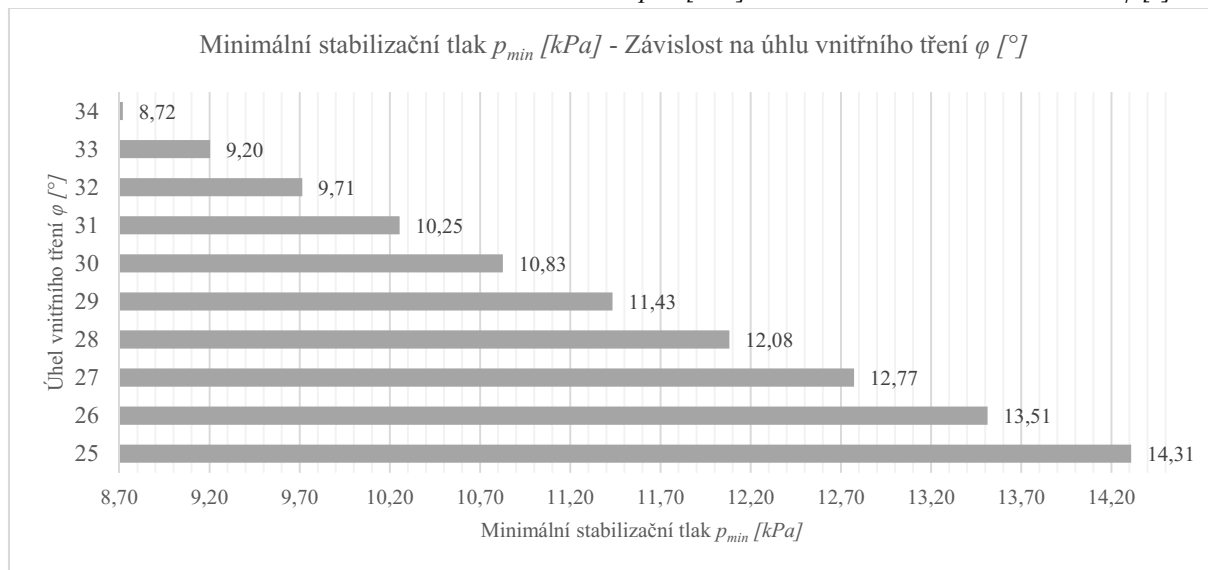
Graf 4.36.: *Vermeer & Ruse* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.48.: *Vermeer & Ruse* - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Poloměr tunelu R [m]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
14,31	19	2	25
13,51	19	2	26
12,77	19	2	27
12,08	19	2	28
11,43	19	2	29
10,83	19	2	30
10,25	19	2	31
9,71	19	2	32
9,20	19	2	33
8,72	19	2	34

Graf 4.37.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



Krause

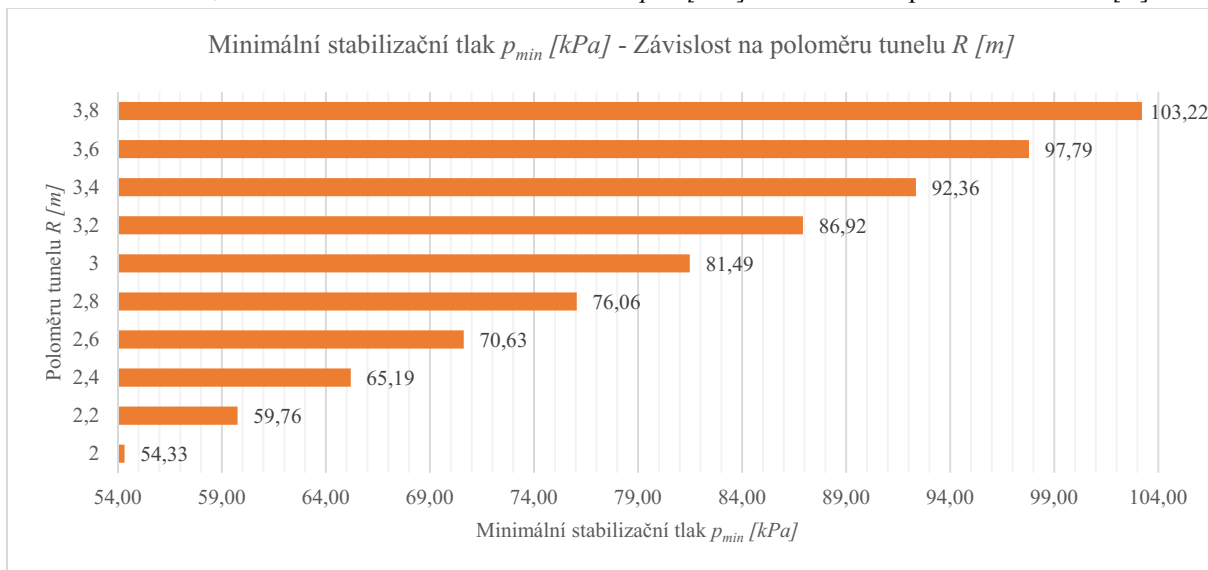
Čtvrtkruh

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.4. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Soudržnost zeminy $c = 0 \text{ kPa}$.

Tabulka 4.49.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření φ [°]
54,33	2	19	25
59,76	2,2	19	25
65,19	2,4	19	25
70,63	2,6	19	25
76,06	2,8	19	25
81,49	3	19	25
86,92	3,2	19	25
92,36	3,4	19	25
97,79	3,6	19	25
103,22	3,8	19	25

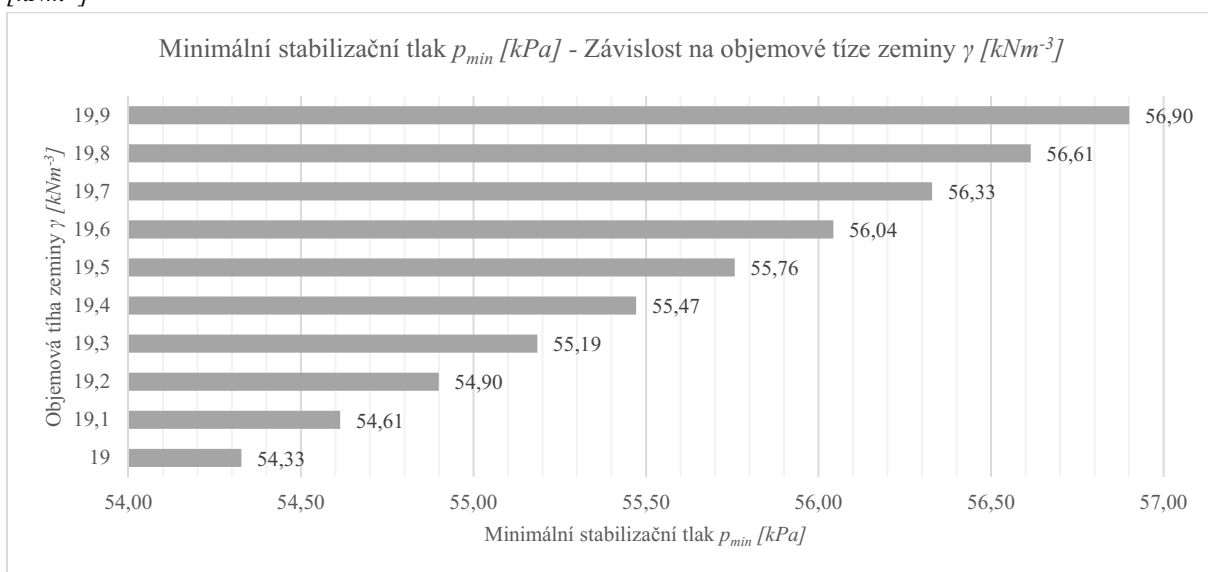
Graf 4.38.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.50.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
54,33	2	19	25
54,61	2	19,1	25
54,90	2	19,2	25
55,19	2	19,3	25
55,47	2	19,4	25
55,76	2	19,5	25
56,04	2	19,6	25
56,33	2	19,7	25
56,61	2	19,8	25
56,90	2	19,9	25

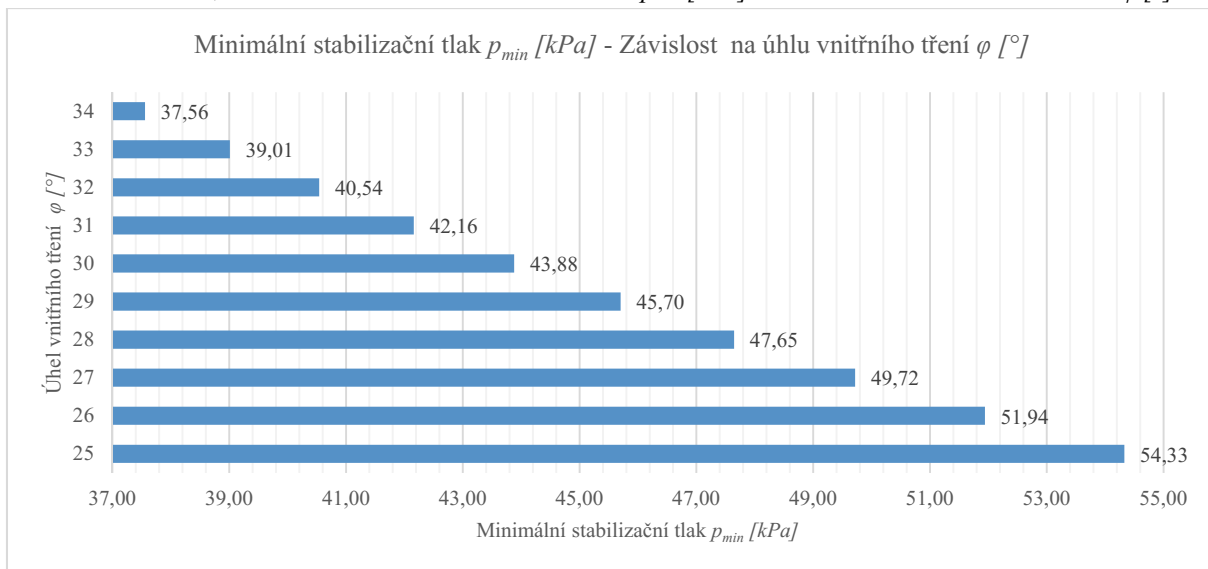
Graf 4.39.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.51.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření φ [°]
54,33	2	19	25
51,94	2	19	26
49,72	2	19	27
47,65	2	19	28
45,70	2	19	29
43,88	2	19	30
42,16	2	19	31
40,54	2	19	32
39,01	2	19	33
37,56	2	19	34

Graf 4.40.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



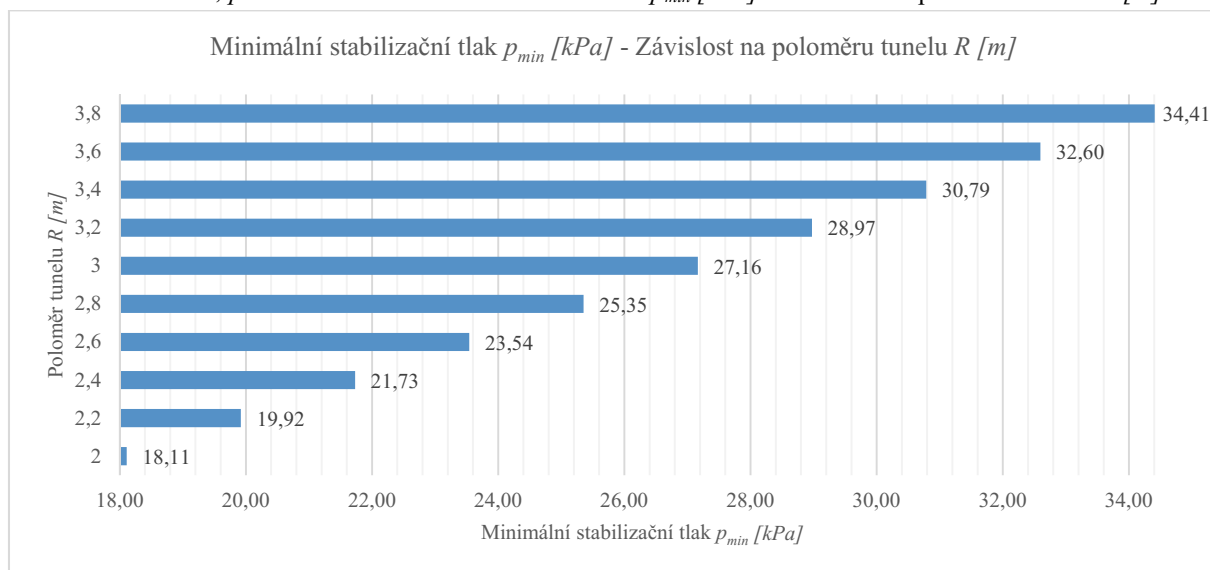
Polokoule

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.5. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Soudržnost zeminy $c = 0 \text{ kPa}$.

Tabulka 4.52.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
18,11	2	19	25
19,92	2,2	19	25
21,73	2,4	19	25
23,54	2,6	19	25
25,35	2,8	19	25
27,16	3	19	25
28,97	3,2	19	25
30,79	3,4	19	25
32,60	3,6	19	25
34,41	3,8	19	25

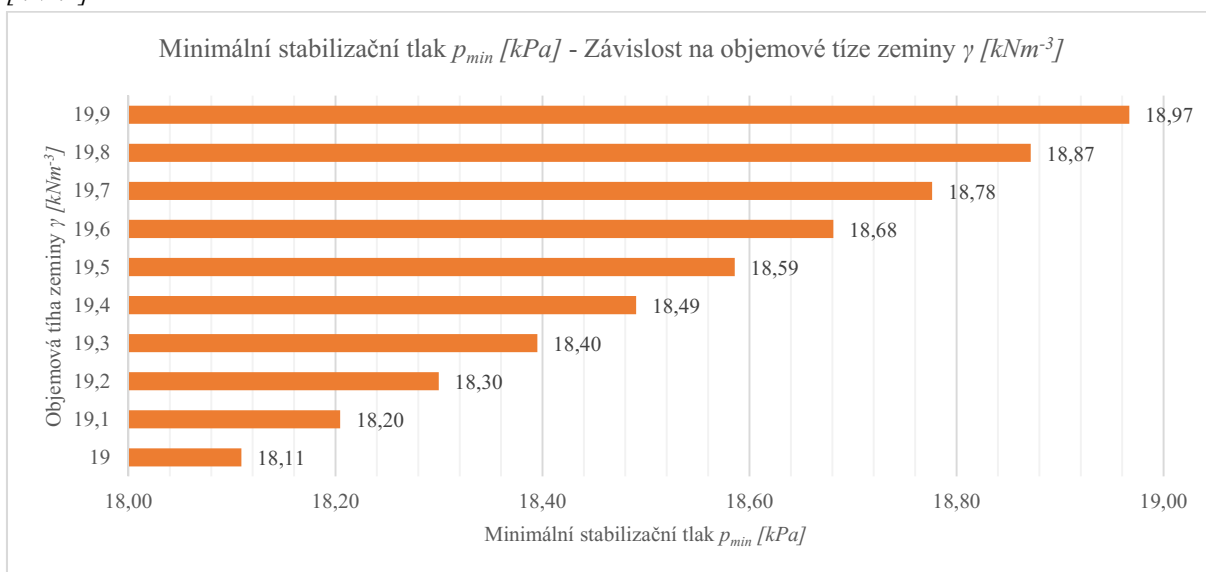
Graf 4.41.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]



Tabulka 4.53.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
18,11	2	19	25
18,20	2	19,1	25
18,30	2	19,2	25
18,40	2	19,3	25
18,49	2	19,4	25
18,59	2	19,5	25
18,68	2	19,6	25
18,78	2	19,7	25
18,87	2	19,8	25
18,97	2	19,9	25

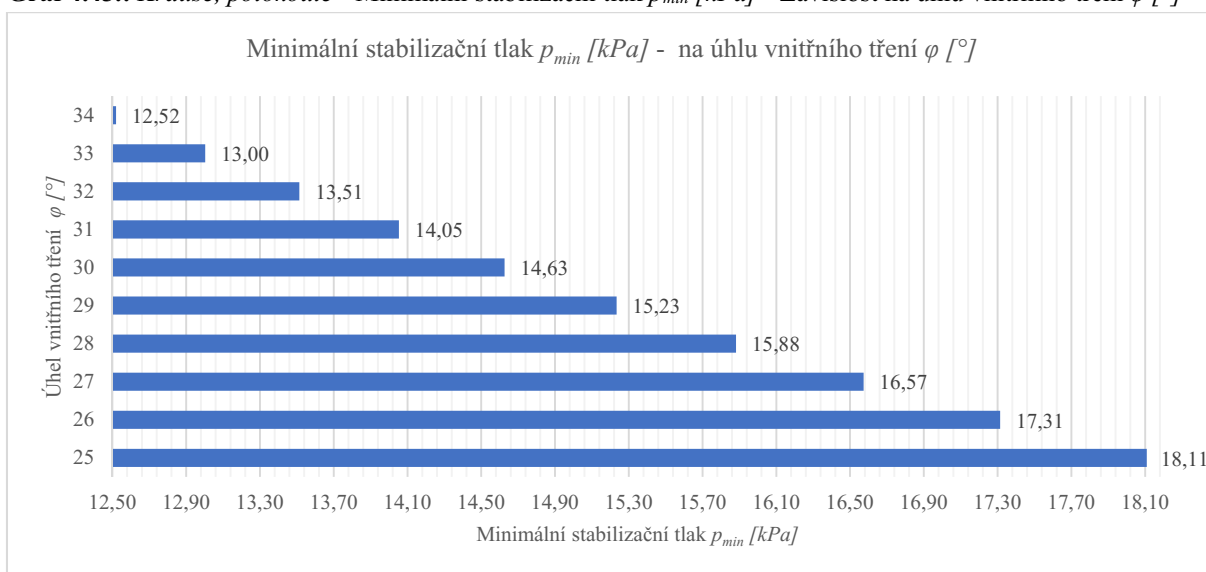
Graf 4.42.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.54.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
18,11	2	19	25
17,31	2	19	26
16,57	2	19	27
15,88	2	19	28
15,23	2	19	29
14,63	2	19	30
14,05	2	19	31
13,51	2	19	32
13,00	2	19	33
12,52	2	19	34

Graf 4.43.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - na úhlu vnitřního tření ϕ [°]



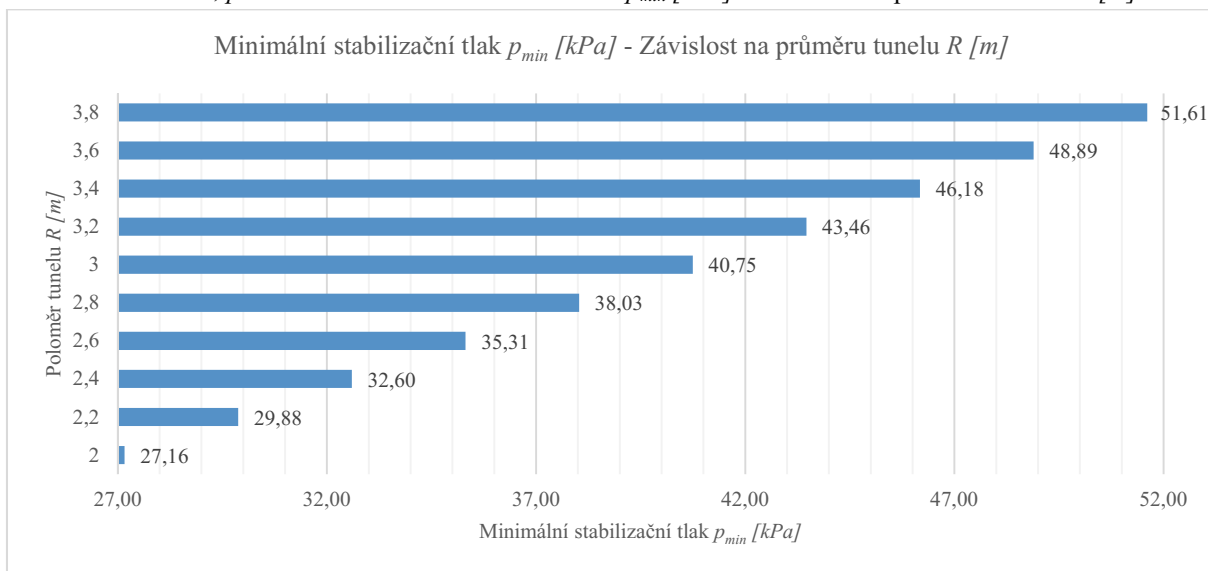
Půlkruh

Výpočet byl prováděn pomocí vzorce 2.3. V tabulkách byly postupně měněny vstupní parametry. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Soudržnost zeminy $c = 0 \text{ kPa}$.

Tabulka 4.55.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na poloměru tunelu $R [m]$

Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$	Poloměr tunelu $R [m]$	Objemová tíha zeminy $\gamma [\text{kNm}^{-3}]$	Úhel vnitřního tření $\varphi [^\circ]$
27,16	2	19	25
29,88	2,2	19	25
32,60	2,4	19	25
35,31	2,6	19	25
38,03	2,8	19	25
40,75	3	19	25
43,46	3,2	19	25
46,18	3,4	19	25
48,89	3,6	19	25
51,61	3,8	19	25

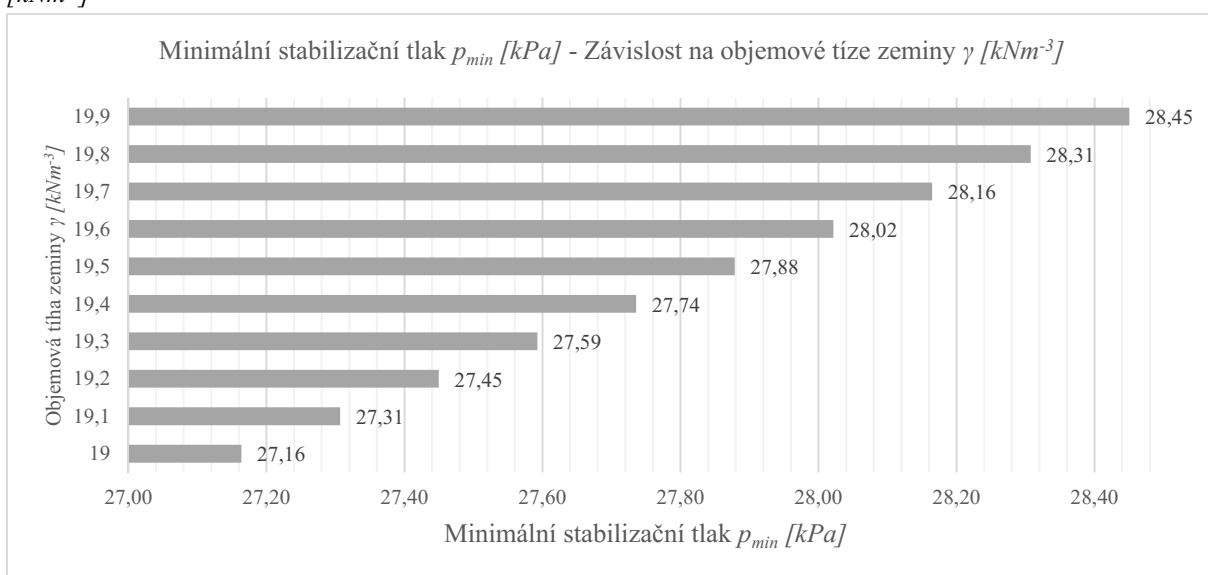
Graf 4.44.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak $p_{min} [\text{kPa}]$ - Závislost na poloměru tunelu $R [m]$



Tabulka 4.56.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
27,16	2	19	25
27,31	2	19,1	25
27,45	2	19,2	25
27,59	2	19,3	25
27,74	2	19,4	25
27,88	2	19,5	25
28,02	2	19,6	25
28,16	2	19,7	25
28,31	2	19,8	25
28,45	2	19,9	25

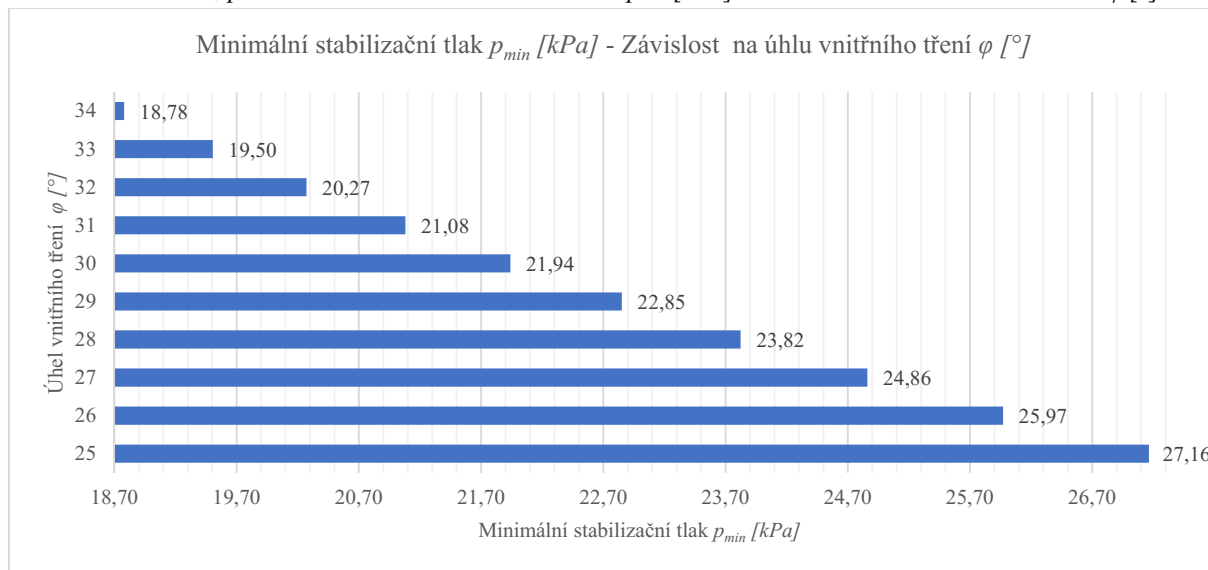
Graf 4.45.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm⁻³]



Tabulka 4.57.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]

Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa]	Poloměr tunelu R [m]	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Úhel vnitřního tření ϕ [°]
27,16	2	19	25
25,97	2	19	26
24,86	2	19	27
23,82	2	19	28
22,85	2	19	29
21,94	2	19	30
21,08	2	19	31
20,27	2	19	32
19,50	2	19	33
18,78	2	19	34

Graf 4.46.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]



5. Vyhodnocení výsledků variantních výpočtů

5.1. Soudržné zeminy

U metody podle Broms & Bennermark počítané podle vzorce 2.2, jsou výsledky uvedené v tabulkách 4.1 až 4.4 a jejich grafické znázornění na vstupních parametrech v grafech 4.1 až 4.4. Na nárůstu hodnot minimálního stabilizačního tlaku měla největší vliv zvyšující se hodnota výšky nadloží. Na snižování hodnoty minimálního stabilizačního tlaku mělo vliv zvyšování neodvodněné smykové pevnosti, vedoucí až k záporným hodnotám, kdy není nutné čelbu stabilizovat. Další vývoje a hodnoty lze sledovat v tabulkách 4.1 až 4.4 a v grafech 4.1 až 4.4. V případě, kdy povrchové přetížení dosáhlo k hodnotám $q_s = 0; 5$ a 10 kPa , došlo ke vzniku záporných hodnot minimálního stabilizačního tlaku. U případu zvyšujících se hodnot neodvodněné smykové pevnosti docházelo ke vzniku záporných hodnot minimálního stabilizačního tlaku, až na dva výjimečné případy pro hodnoty neodvodněné smykové pevnosti $c_u = 40$ a 43 kPa . Výpočty pro tento parametr nejsou součástí textové části této práce, ale jsou součástí elektronické výpočtové přílohy v prostředí Excel.

U metody podle Davis a spol. počítané podle vzorce 2.26, jsou výsledky uvedené v tabulkách 4.5 a 4.6 a jejich grafické znázornění na vstupních parametrech v grafech 4.5 a 4.6. Na nárůstu hodnot minimálního stabilizačního tlaku, měla největší vliv zvyšující se hodnota výšky nadloží. Na snižování hodnoty minimálního stabilizačního tlaku mělo vliv zvyšování neodvodněné smykové pevnosti, vedoucí až k záporným hodnotám, kdy není nutné čelbu stabilizovat. V prvních řádcích tabulek 4.5 a 4.6 došlo ke vzniku záporných hodnot minimálního stabilizačního tlaku, zde není nutné čelbu stabilizovat. U případů zvyšujících se hodnot neodvodněné smykové pevnosti a snižujících se hodnot povrchového přetížení docházelo ke vzniku záporných hodnot minimálního stabilizačního tlaku. Výpočty pro tyto parametry nejsou součástí textové části této práce, ale jsou součástí elektronické výpočtové přílohy této práce v prostředí Excel.

U metody podle Krause pro jednotlivé tvary (čtvrtkruh, polokoule a půlkruh) deformace počítané podle vzorců 2.4, 2.5 a 2.3 jsou uvedené v tabulkách 4.7 až 4.14 a jejich grafické

znázornění na vstupních parametrech v grafech 4.7 až 4.14. Nejnižších hodnot minimálního stabilizačního tlaku podle deformace dosahovala deformace tvaru polokoule, u deformace tvaru čtvrtkruhu je tomu přesně naopak, což je patrné už podle vzorců. Na zvyšující se hodnotu minimálního stabilizačního tlaku má vliv zvyšující se objemová hmotnost zeminy a poloměr tunelu, ale poloměr tunelu má větší vliv na tuto hodnotu. Vliv na snižování minimálního stabilizačního tlaku má zvyšování hodnoty soudržnosti zeminy a úhel vnitřního tření zeminy, ale větší vliv na snížení minimálního stabilizačního tlaku má vliv soudržnosti zeminy. Další vývoje a hodnoty lze sledovat v tabulkách 4.7 až 4.14 a v grafech 4.7 až 4.14. V případě deformace ve tvaru polokoule uvedené v tabulce 4.11 docházelo u prvních dvou řádku, k tomu že hodnoty minimálního stabilizačního tlaku měly zápornou hodnotu. V tomto případě není nutné čelbu stabilizovat. U deformace ve tvaru polokoule docházelo v případech objemových hmotností zemin, soudržnosti zemin a úhlů vnitřního tření zemin, k tomu že minimální stabilizační tlak dosahoval záporných hodnot, vzhledem k tomuto faktu nebyly tyto výpočty zařazené do textové části této práce, ale jsou součástí elektronické výpočtové přílohy této práce v prostředí Excel.

U metody podle Jancsecz & Steiner počítané podle vzorů uvedených v kapitole 2.1. Výsledky jsou uvedené v tabulkách 4.15 až 4.28 a grafické vyhodnocení v grafech 4.15 až 4.21. Jednotlivé průběhy lze sledovat ve výše uvedených tabulkách a grafech. V případě zvyšování hodnoty soudržnosti zeminy docházelo od hodnoty $c = 8 \text{ kPa}$, k tomu že hodnoty vycházely záporné. Výpočty pro tento parametr nejsou součástí textové části této práce, ale jsou zařazeny v elektronické výpočtové příloze v prostředí Excel.

U metody podle Vermeer & Ruse počítané podle vzorce 4.1, jsou uvedené v tabulkách 4.29 až 4.31 a grafické vyhodnocení v grafech 4.22 až 4.24. Na zvyšující se hodnotu minimálního stabilizačního tlaku má vliv zvyšující se objemová hmotnost zeminy a poloměr tunelu, ale poloměr tunelu má větší vliv na tuto hodnotu. Vliv na snižování minimálního stabilizačního tlaku má zvyšování hodnoty soudržnosti zeminy a úhel vnitřního tření zeminy, ale větší vliv na snížení minimálního stabilizačního tlaku má vliv soudržnosti zeminy. Další vývoje a hodnoty lze sledovat v tabulkách 4.29 až 4.31 a v grafech 4.22 až 4.24. V případě zvyšování hodnoty soudržnosti zeminy docházelo k tomu, že minimální stabilizační tlak dosáhl hodnot záporných.

Výpočty pro tento parametr nejsou součástí textové části této práce, ale jsou uváděny v elektronické výpočtové příloze v prostředí Excel.

5.2. Nesoudržné zeminy

U metody podle Atkinson & Potts v řešení lower bound podle vzorce 2.19 a pro výpočet součinitele pasivního tlaku vzorce 2.20, jsou uvedené v tabulkách 4.32 až 4.34 a znázorněné v grafech 4.25 až 4.27. Vliv na zvyšování minimálního stabilizačního tlaku má objemová tíha zeminy a poloměr tunelu, i v tomto případě větší vliv má poloměr tunelu. Úhel vnitřního tření má vliv na snížení minimálního stabilizačního tlaku. Další vývoje a hodnoty lze sledovat v tabulkách a grafech výše uvedených.

U metody podle Atkinson & Potts v řešení upper bound podle vzorce 2.21, jsou uvedené v tabulkách 4.35 až 4.37 a znázorněné v grafech 4.28 až 4.30. Vliv na zvyšování minimálního stabilizačního tlaku má objemová tíha zeminy a poloměr tunelu, i v tomto případě větší vliv má poloměr tunelu. Úhel vnitřního tření má vliv na snížení minimálního stabilizačního tlaku. Další vývoje a hodnoty lze sledovat v tabulkách a grafech výše uvedených.

U metody podle Leca & Dormieux počítané podle vzorců uvedených v kapitole 2.1 pro mechanismus I a II. Tyto výpočty jsou uvedené v tabulkách 4.38 až 4.45 a jejich grafické znázornění v grafech 4.31 až 4.34, lze sledovat vliv jednotlivých vstupních parametru na minimální stabilizační tlak.

U metody podle Vermeer & Ruse v nesoudržných zeminách počítaných podle vzorce 4.1. Hodnoty jsou obdobné jako u soudržných zemin, jenom jejich hodnoty jsou vyšší vzhledem, ke zvolené nulové soudržnosti zeminy. Hodnoty jsou v tabulkách 4.46 až 4.48 a jejich grafické znázornění v grafech 4.35 až 4.37.

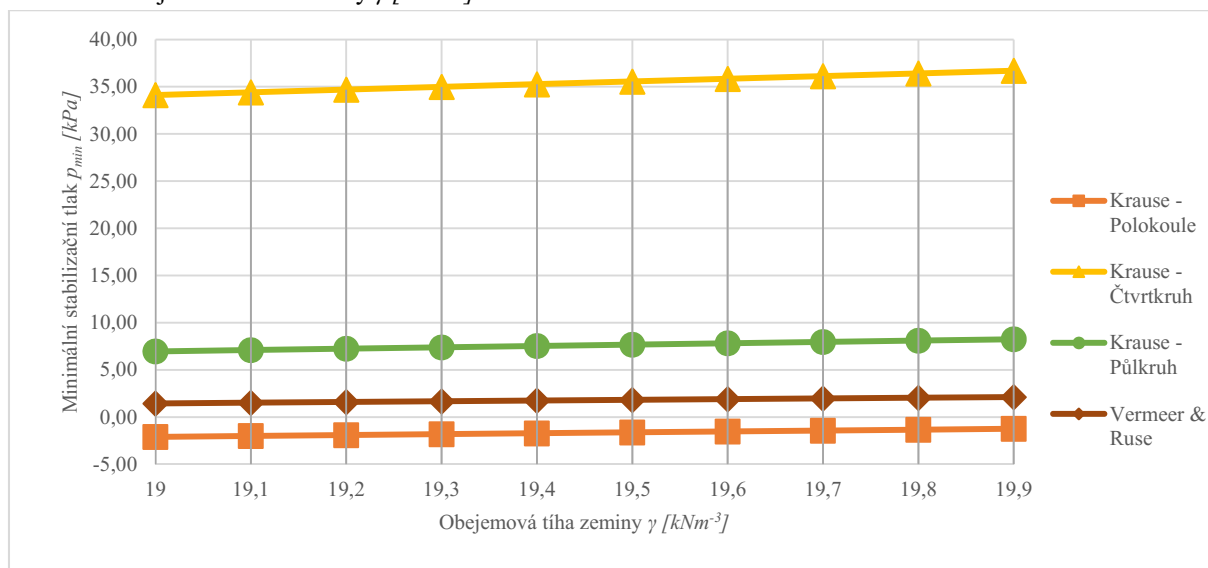
U metody podle Krause v nesoudržných zeminách počítaných podle vzorců uvedených u soudržných zemin. Hodnoty jsou obdobné jako u soudržných zemin, jenom jejich hodnoty

jsou vyšší vzhledem, ke zvolené nulové soudržnosti zeminy. Hodnoty jsou v tabulkách 4.49 až 4.57 a jejich grafické znázornění v grafech 4.38 až 4.46.

5.3. Srovnání metod v soudržných zeminách

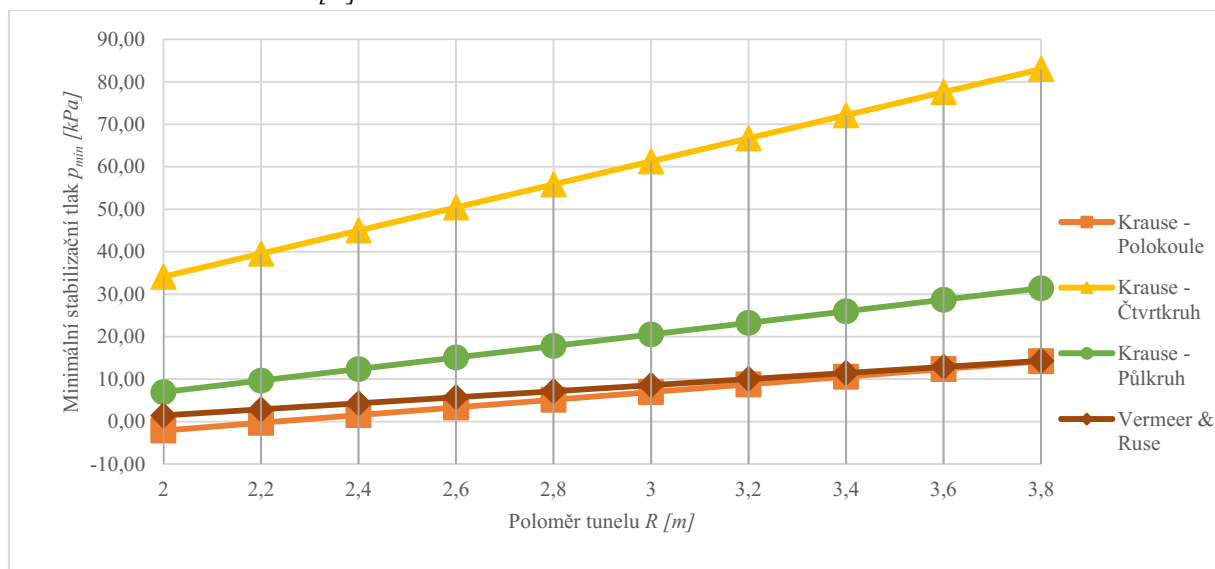
Srovnání podle objemových tíh zeminy v rozsahu uvedeném v grafu 5.1. Pro metody uvedené v grafu 5.1. Minimální stabilizační tlak ve srovnání závislostí na narůstající objemové tíze zeminy ukázalo, že největší hodnoty minimálního stabilizačního tlaku dosahuje metoda podle Krause pro tvar deformace čtvrtkruhu. Nejnížší hodnoty dosahuje metoda podle stejného autora, ale pro deformaci polokoule.

Graf 5.1.: Objemová tíha zeminy γ [kNm^{-3}]



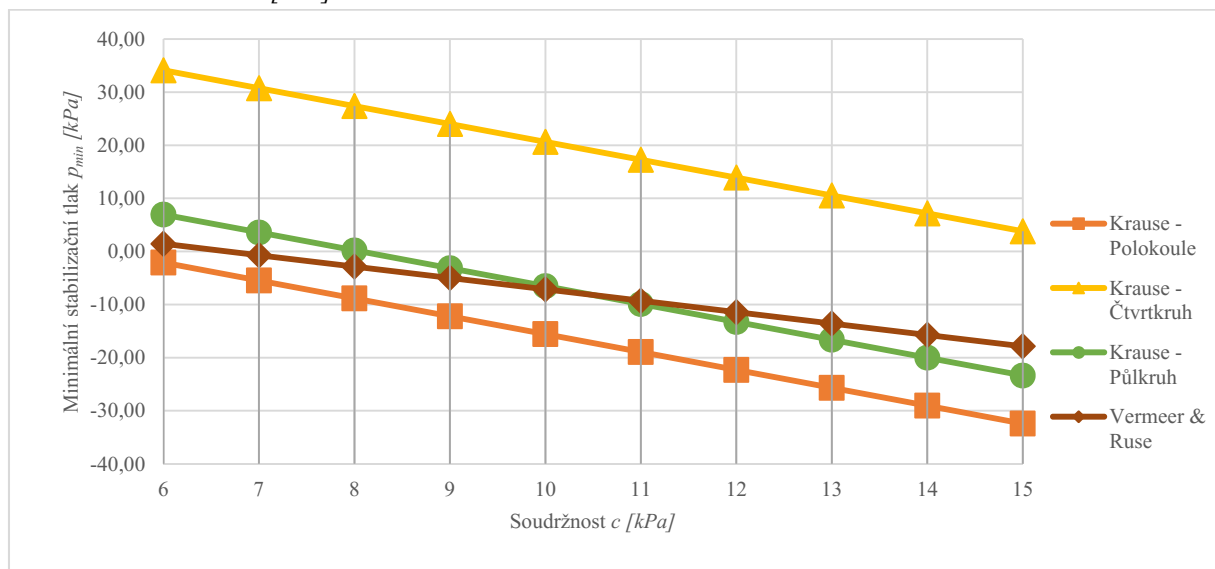
Srovnání podle poloměru tunelu v rozsahu uvedeném v grafu 5.2. Pro metody uvedené v grafu 5.2. Minimální stabilizační tlak ve srovnání závislostí na narůstajícím poloměru tunelu ukázalo, že největší hodnoty minimálního stabilizačního tlaku dosahuje metoda podle Krause pro tvar deformace čtvrtkruhu. Nejnížší hodnoty dosahuje metoda podle stejného autora, ale pro deformaci polokoule. U poloměru $R = 3,8$ m se metoda podle Krause a deformace polokoule dostala na podobnou hodnotu jako metoda podle Vermeer & Ruse.

Graf 5.2.: Poloměr tunelu R [m]



Srovnání podle soudržnosti zeminy v rozsahu uvedeném v grafu 5.3. Pro metody uvedené v grafu 5.3. Minimální stabilizační tlak ve srovnání závislosti na narůstající soudržnosti zeminy ukázalo, že největší hodnoty minimálního stabilizačního tlaku dosahuje metoda podle Krause pro tvar deformace čtvrtkruhu. Nejnížší hodnoty dosahuje metoda podle stejného autora, ale pro deformaci polokouli.

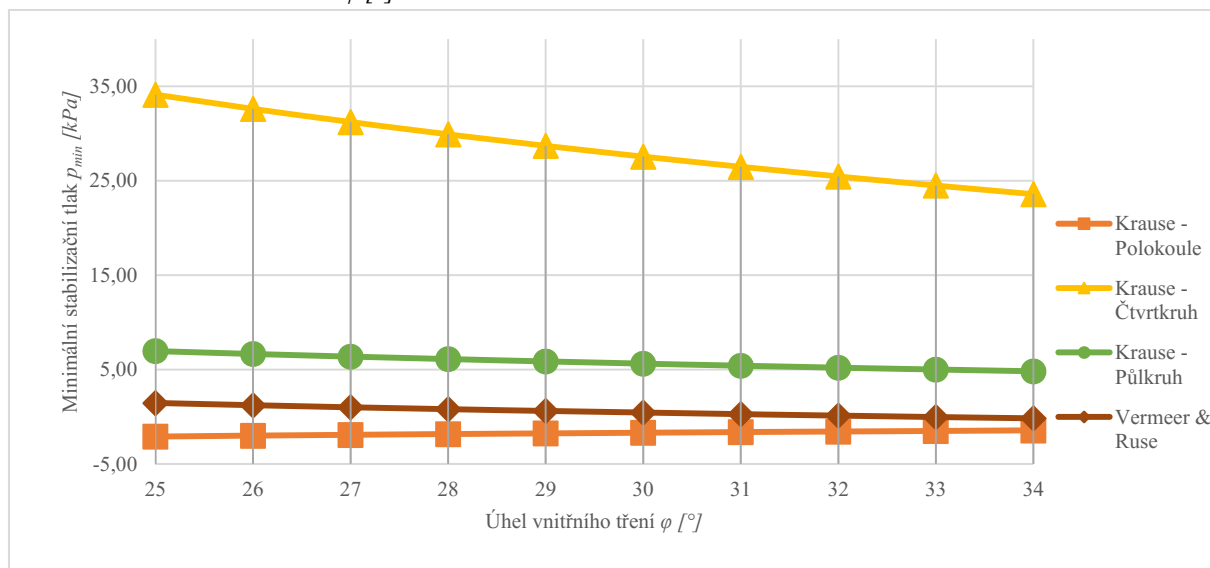
Graf 5.3.: Soudržnost c [kPa]



Srovnání podle úhlu vnitřního tření v rozsahu uvedeném v grafu 5.4. Pro metody uvedené v grafu 5.4. Minimální stabilizační tlak ve srovnání závislosti na narůstajícím úhlu vnitřního tření ukázalo, že největší hodnoty minimálního stabilizačního tlaku dosahuje metoda podle

Krause pro tvar deformace čtvrtkruhu. Nejnižší hodnoty dosahuje metoda podle stejného autora, ale pro deformaci polokouli.

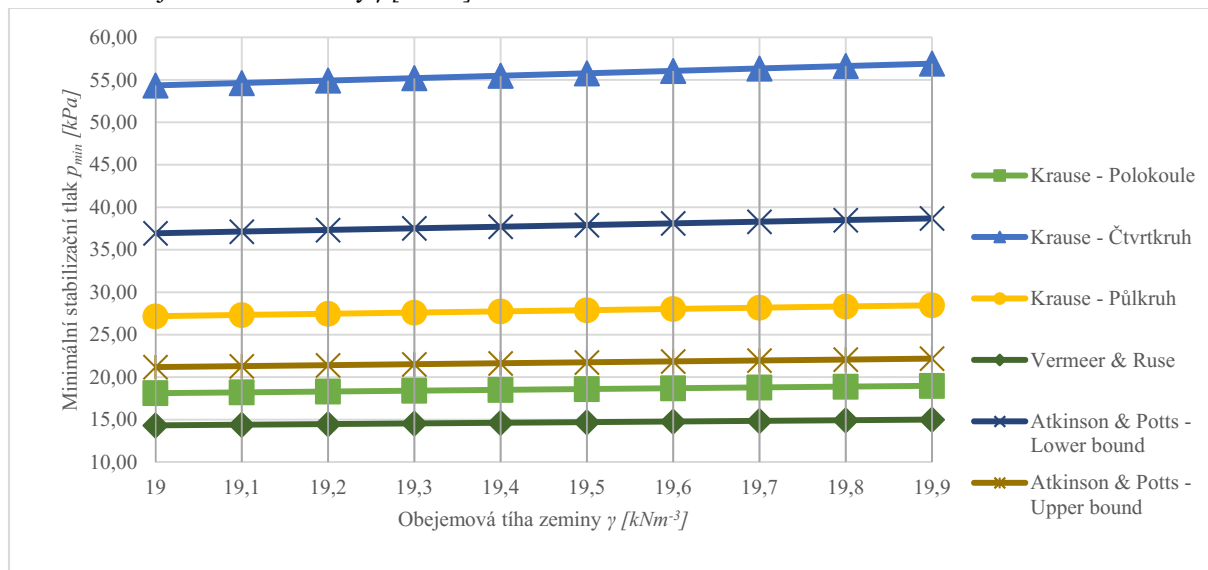
Graf 5.4.: Úhel vnitřního tření φ [°]



5.4. Srovnání metod v nesoudržných zeminách

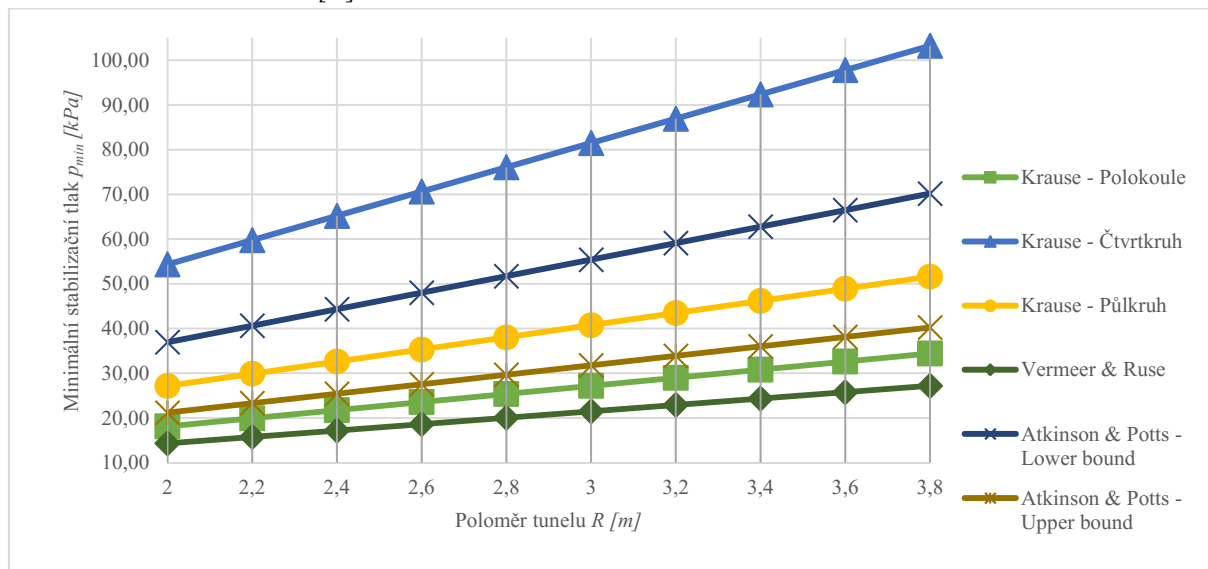
Srovnání podle objemových tíh zeminy v rozsahu uvedeném v grafu 5.5 Pro metody uvedené v grafu 5.5. Minimální stabilizační tlak ve srovnání závislosti na narůstající objemové tíze zeminy ukázalo, že největší hodnoty minimálního stabilizačního tlaku dosahuje metoda podle Krause pro tvar deformace čtvrtkruhu. Nejnižší hodnoty dosahuje metoda Vermeer & Ruse.

Graf 5.5.: Objemová tíha zeminy γ [kNm^{-3}]



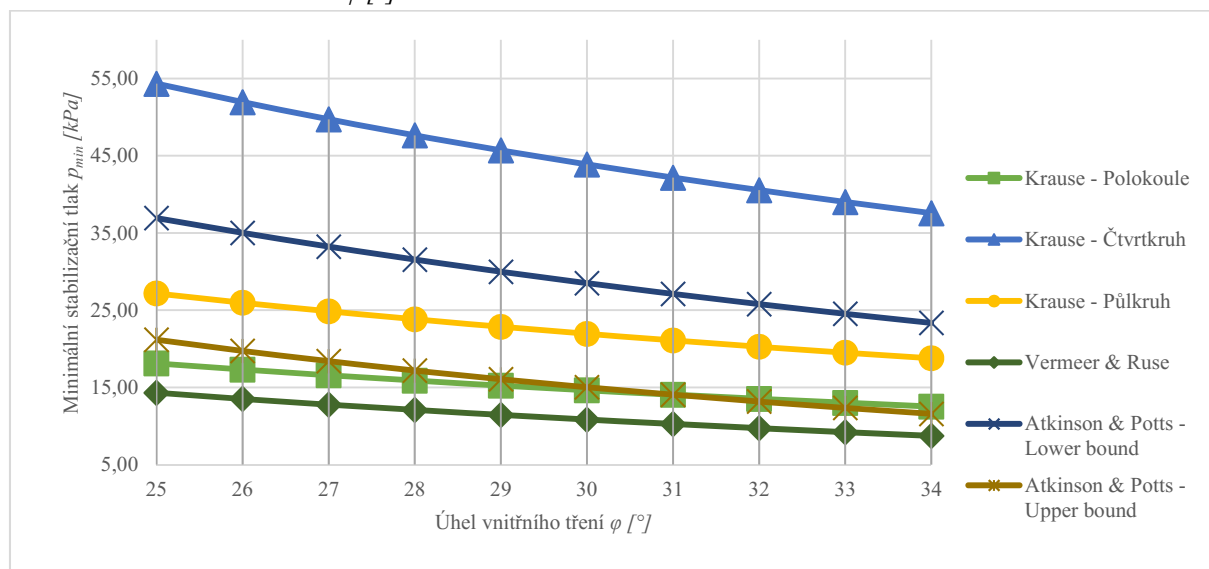
Srovnání podle poloměru tunelu v rozsahu uvedeném v grafu 5.6. Pro metody uvedené v grafu 5.6. Minimální stabilizační tlak ve srovnání závislosti na narůstajícím poloměru tunelu ukázalo, že největší hodnoty minimálního stabilizačního tlaku dosahuje metoda podle Krause pro tvar deformace čtvrtkruhu. Nejnižší hodnoty dosahuje metoda Vermeer & Ruse.

Graf 5.6.: Poloměr tunelu R [m]



Srovnání podle úhlu vnitřního tření v rozsahu uvedeném v grafu 5.7. Pro metody uvedené v grafu 5.7. Minimální stabilizační tlak ve srovnání závislosti na narůstajícím úhlu vnitřního tření ukázalo, že největší hodnoty minimálního stabilizačního tlaku dosahuje metoda podle Krause pro tvar deformace čtvrtkruhu. Nejnižší hodnoty dosahuje metoda Vermeer & Ruse.

Graf 5.7.: Úhel vnitřního tření φ [°]



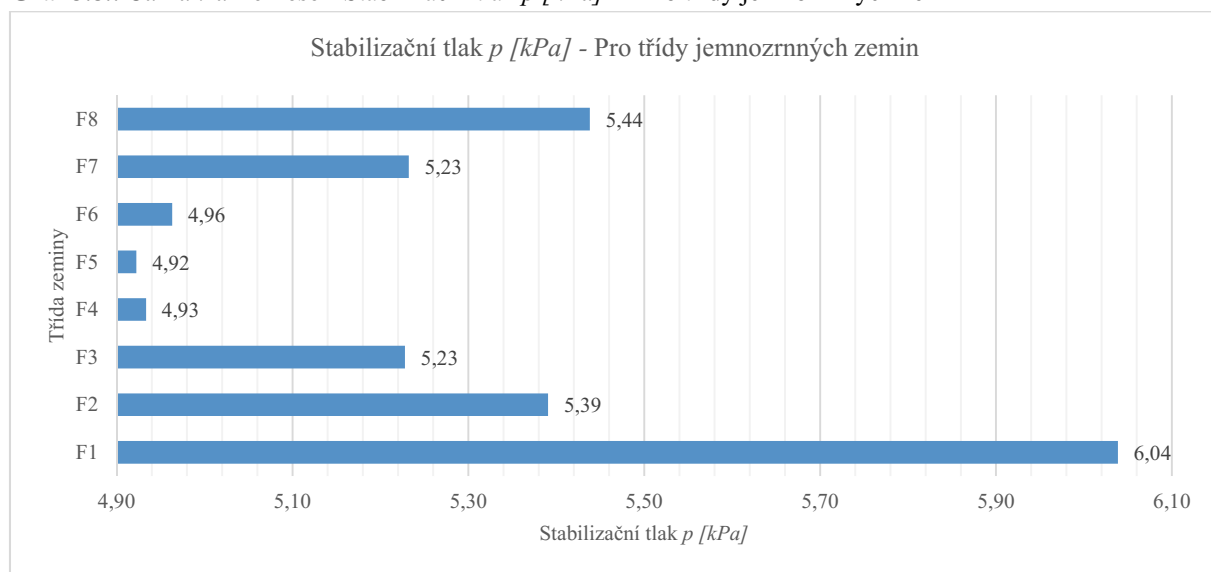
5.5. Vlastnosti zemin dle směrných normových charakteristik dle ČSN 73 1001

Vstupní parametry získané v tabulce normy ČSN 73 1001, směrné normové charakteristiky jemnozrnných zemin. Hodnoty pro měkkou konzistenci těchto tříd zemin. Výpočet byl prováděn podle metody Carranza-Torrese. Vztahy a model stability čelby naleznete v kapitole 2.1. Faktor bezpečnosti $FS = 2$. Nejnížší hodnotu minimálního stabilizačního tlaku dosáhla třída zemin F5, což jsou hlíny s nízkou plasticitou a střední plasticitou. Nejvyšší hodnotu minimálního stabilizačního tlaku dosáhla třída zeminy F1, což jsou hlíny šterkovité. Výsledky pro další třídy zemin naleznete v tabulce 5.1 a jejich grafické vyhodnocení v grafu 5.8.

Tabulka 5.1.: Carranza-Torrese - Stabilizační tlak p [kPa] - Pro třídy jemnozrnných zemin

Třída zeminy	Symbol zeminy	Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	Soudržnost c [kPa]	Úhel vnitřního tření φ [°]	Poloměr tunelu R [m]	Výška nadloží C [m]	Přetížení na povrchu q_s [kPa]	N_{φ}^{FS}	Součinitel tvaru K	Stabilizační tlak p [kPa]	$\frac{p}{\gamma * R}$
F1	MG	19,0	8,0	29,0	2,0	10,0	45	1,729	1,0	6,04	0,159
F2	CG	19,5	10,0	27,0	2,0	10,0	45	1,656	1,0	5,39	0,138
F3	MS	18,0	12,0	26,5	2,0	10,0	45	1,638	1,0	5,23	0,145
F4	CS	18,5	14,0	24,5	2,0	10,0	45	1,571	1,0	4,93	0,133
F5	ML, MI	20,0	12,0	21,0	2,0	10,0	45	1,465	1,0	4,92	0,123
F6	CL, CI	21,0	12,0	19,0	2,0	10,0	45	1,409	1,0	4,96	0,118
F7	CH, CV, CE	21,0	7,0	17,0	2,0	10,0	45	1,356	1,0	5,23	0,125
F8	MS	20,5	5,0	15,0	2,0	10,0	45	1,306	1,0	5,44	0,133

Graf 5.8.: Carranza-Torrese - Stabilizační tlak p [kPa] - Pro třídy jemnozrnných zemin



6. Formulace doporučení a závěr

V této práci bylo uvedeno několik principů pro stanovení stabilizačního tlaku raženého tunelu pomocí analytických metod. A to metody podle Broms & Bennermark, Atkinson & Potts (lower a upper bound), Davis a spol., Krause (půlkruh čtvrtkruh, polokoule), Leca & Dormieux, Jancsecz & Steiner, Vermeer & Ruse a Carranza-Torrese. Pro soudržné a nesoudržné zeminy. Všechny metody jsou jenom pro homogenní prostředí.

Byly provedené variantní výpočty pro tyto metody a to podle vstupních parametrů. Objemová tíha zeminy byla volena v rozsahu $\gamma = 19 \sim 19,9 \text{ kNm}^{-3}$. Poloměr tunelu byl volen v rozsahu $R = 2 \sim 3,8 \text{ m}$. Úhel vnitřního tření byl volen v rozsahu $\varphi = 25 \sim 34^\circ$. Přetížení na povrchu bylo voleno v rozsahu $q_s = 0 \sim 45 \text{ kPa}$. Výška nadloží byla volena v rozsahu $C = 10 \sim 37 \text{ m}$ a $C = 3 \sim 12 \text{ m}$ pro metodu Jancsecz & Steiner. Neodvodněná smyková pevnost byla volena v rozsahu $c_u = 40 \sim 67 \text{ kPa}$. Výška hladiny podzemní vody byla volena v rozsahu $H = 5 \sim 5,9 \text{ m}$. Objemová tíha zeminy pod hladinou podzemní vody byla volena v rozsahu $\gamma_{su} = 10,5 \sim 11,4 \text{ kNm}^{-3}$. Objemová tíha vysušené zeminy byla volena v rozsahu $\gamma_d = 17,5 \sim 18,4 \text{ kNm}^{-3}$. Soudržnost zeminy byla volena v rozsahu $c = 6 \sim 15 \text{ kPa}$.

V soudržných metodách byly srovnány metody podle Krause (půlkruh čtvrtkruh, polokoule) a Vermeer & Ruse. U všech těchto srovnání nejvyšších hodnot minimálního stabilizačního tlaku dosahovala metoda podle Krause pro tvar deformace čtvrtkruh. A nejnižších hodnot minimálního stabilizačního tlaku dosahovala metoda podle Krause pro tvar deformace polokoule. Zde došlo k srovnání i v případech kdy minimální stabilizační tlak dosahoval záporných hodnot. Změny vstupních parametrů nemají vliv na toto srovnání.

V nesoudržných metodách byly srovnány metody podle Krause (půlkruh, čtvrtkruh a polokoule), Atkinson & Potts (lower a upper bound) a Vermeer & Ruse. Podle objemové hmotnosti, poloměru tunelu a úhlu vnitřního tření. U všech těchto srovnání nejvyšších hodnot minimálního stabilizačního tlaku dosahovala metoda podle Krause pro tvar deformace

čtvrtkruh. A nejnižších hodnot minimálního stabilizačního tlaku dosahovala metoda podle Vermeer & Ruse.

U metody podle Carranza-Torrese, kde byly srovnány jednotlivé třídy jemnozrnných zemin, nejvyšší hodnoty dosáhla třída zemin F1 a nejnižší F5.

Dále byl vypracován výpočetní program v prostředí Excel (Makro – Visual basic). Pro metody Davis a spol., Krause (půlkruh, čtvrtkruh a polokoule), Broms & Bennermark, Atkinson & Potts (lower a upper bound) a Vermeer & Ruse pro rychlé výpočty minimálního stabilizačního tlaku v praxi.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1.: Broms & Bennermark - Model stability čelby [4]	14
Obrázek 2.2.: Krause - Model stability čelby [1]	15
Obrázek 2.3.: Jancsecz & Steiner - Model stability čelby [4]	16
Obrázek 2.4.: Carranza-Torrese - Model stability čelby [4].....	19
Obrázek 2.5.: Atkinson & Potts - Model stability čelby [4]	20
Obrázek 2.6.: Atkinson & Potts - Upper bound mechanismus [1]	21
Obrázek 2.7.: Davis a spol. - Model stability čelby [4].....	22
Obrázek 2.8.: Davis a spol. - Upper bound mechanismus [1]	23
Obrázek 2.9.: Leca & Dormieux - Upper bound - Mechanismus MI a MII [1]	25
Obrázek 2.10.: Leca & Dormieux - Lower bound - Napjatost SI (a), SII (b) a SIII (c) [5] ...	28
Obrázek 2.11.: Leca & Dormieux - Upper bound - Mechanismus MII [1].....	30

Seznam tabulek

Tabulka 2.1.: Přehled analytických metod pro stanovení stabilizačního tlaku na čelbu a jejich principy [2].....	11
Tabulka 2.2.: Broms & Bennermark - Popis deformací půdy k poměrné stabilitě N [1]	13
Tabulka 2.3.: Jancsecz & Steiner - Interpolační tabulka pro zjištění β [1].....	17
Tabulka 2.4.: Jancsecz & Steiner - Interpolační tabulka pro koeficient zemního tlaku K_{A3} [1]	18
Tabulka 4.1.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm^{-3}].....	35
Tabulka 4.2.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m].....	36
Tabulka 4.3.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	37
Tabulka 4.4.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přetížení q_s [kPa].....	37
Tabulka 4.5.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m].....	38
Tabulka 4.6.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	39
Tabulka 4.7.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	40
Tabulka 4.8.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm^{-3}].....	41
Tabulka 4.9.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na soudržnosti c [kPa]	41
Tabulka 4.10.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]	42
Tabulka 4.11.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	43
Tabulka 4.12.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	44
Tabulka 4.13.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm^{-3}].....	44
Tabulka 4.14.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]	45
Tabulka 4.15.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	46
Tabulka 4.16.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.15	46
Tabulka 4.17.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m].....	47
Tabulka 4.18.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.17	47
Tabulka 4.19.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na výšce HPV H [m]	48
Tabulka 4.20.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.19	48

Tabulka 4.21.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy pod HPV γ_{su} [kNm ⁻³]	49
Tabulka 4.22.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.21	50
Tabulka 4.23.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze vysušené zeminy γ_d [kNm ⁻³].....	51
Tabulka 4.24.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.23	51
Tabulka 4.25.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přitížení q_s [kPa].....	52
Tabulka 4.26.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.25	53
Tabulka 4.27.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]	54
Tabulka 4.28.: Jancsecz & Steiner - Pomocné výpočty pro tabulku 4.27	54
Tabulka 4.29.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³].....	55
Tabulka 4.30.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	56
Tabulka 4.31.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]	57
Tabulka 4.32.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	58
Tabulka 4.33.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m].....	58
Tabulka 4.34.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°].....	59
Tabulka 4.35.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	60
Tabulka 4.36.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m].....	61
Tabulka 4.37.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°].....	62
Tabulka 4.38.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na povrchovém přitížení q_s [kPa].....	63
Tabulka 4.39.: Leca & Dormieux - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.38	63
Tabulka 4.40.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m].....	64
Tabulka 4.41.: Leca & Dormieux - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.40	64
Tabulka 4.42.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³].....	65
Tabulka 4.43.: Leca & Dormieux - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.42	65
Tabulka 4.44.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření ϕ [°]	66
Tabulka 4.45.: Leca & Dormieux - Výpočty bezrozměrných a geometrických faktorů - Pro tabulku 4.44	66

Tabulka 4.46.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³].....	67
Tabulka 4.47.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m].....	68
Tabulka 4.48.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	68
Tabulka 4.49.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m].....	69
Tabulka 4.50.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³].....	70
Tabulka 4.51.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	71
Tabulka 4.52.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m].....	72
Tabulka 4.53.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³].....	72
Tabulka 4.54.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	73
Tabulka 4.55.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m].....	74
Tabulka 4.56.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³].....	75
Tabulka 4.57.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	75
Tabulka 5.1.: Carranza-Torrese - Stabilizační tlak p [kPa] - Pro třídy jemnozrnných zemin	85

Seznam grafů

Graf 4.1.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm^{-3}].....	36
Graf 4.2.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m].....	36
Graf 4.3.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	37
Graf 4.4.: Broms & Bennermark - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na povrchovém přetížení q_s [kPa].....	38
Graf 4.5.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m]	39
Graf 4.6.: Davis a spol. - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	39
Graf 4.7.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	40
Graf 4.8.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm^{-3}].....	41
Graf 4.9.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na soudržnosti c [kPa]	42
Graf 4.10.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	42
Graf 4.11.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	43
Graf 4.12.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	44
Graf 4.13.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm^{-3}].....	45
Graf 4.14.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	45
Graf 4.15.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	47
Graf 4.16.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na výšce nadloží C [m].....	48
Graf 4.17.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na výšce HPV H [m]	49
Graf 4.18.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy pod HPV γ_{su} [kNm^{-3}].....	50
Graf 4.19.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze vysušené zeminy γ_d [kNm^{-3}].....	52
Graf 4.20.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na povrchovém přetížení q_s [kPa].....	53
Graf 4.21.: Jancsecz & Steiner - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	55
Graf 4.22.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm^{-3}].....	56

Graf 4.23.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	56
Graf 4.24.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	57
Graf 4.25.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	58
Graf 4.26.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	59
Graf 4.27.: Atkinson & Potts, lower bound - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	60
Graf 4.28.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	61
Graf 4.29.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	61
Graf 4.30.: Atkinson & Potts, upper bound - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	62
Graf 4.31.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na povrchovém přetížení q_s [kPa]	63
Graf 4.32.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	64
Graf 4.33.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	65
Graf 4.34.: Leca & Dormieux - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	66
Graf 4.35.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	67
Graf 4.36.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	68
Graf 4.37.: Vermeer & Ruse - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	69
Graf 4.38.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	70
Graf 4.39.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	70
Graf 4.40.: Krause, čtvrtkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	71
Graf 4.41.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	72
Graf 4.42.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	73
Graf 4.43.: Krause, polokoule - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	73
Graf 4.44.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na poloměru tunelu R [m]	74
Graf 4.45.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na objemové tíze zeminy γ [kNm ⁻³]	75

Graf 4.46.: Krause, půlkruh - Minimální stabilizační tlak p_{\min} [kPa] - Závislost na úhlu vnitřního tření φ [°]	76
Graf 5.1.: Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	80
Graf 5.2.: Poloměr tunelu R [m]	81
Graf 5.3.: Soudržnost c [kPa]	81
Graf 5.4.: Úhel vnitřního tření φ [°]	82
Graf 5.5.: Objemová tíha zeminy γ [kNm ⁻³]	83
Graf 5.6.: Poloměr tunelu R [m]	83
Graf 5.7.: Úhel vnitřního tření φ [°]	84
Graf 5.8.: Carranza-Torrese - Stabilizační tlak p [kPa] - Pro třídy jemnozrnných zemin	85

Seznam příloh

Příloha 1.: Tabulka směrné normové charakteristiky jemnozrnných zemin. Převzata z normy ČSN 73 1001.	97
Příloha 2.: Ukázka zpracování Makra.....	98

Literatura

1. Backus, M. F. *Tunnel Face Stability in Dutch Soul*. Master's thesis, Delft University of Technology, 1998.
2. Broere, W. *Tunnel Face Stability and New CPT Applications*. Delft University Press 2001. ISBN 90-407-2215-3.
3. Hruběšová E., Ďuriš L, Mohammed J. *Variantní přístupy k výpočtu stabilizačního tlaku na čelbu při ražbě tunelů plnoprofilovými tunelovacími stroji*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, Ostrava, Česká republika 2016.
4. Javad Mohammadi, Kourosh Shahriar, Parviz Moarefvand. *Tunnel Face Stability Analysis in Soft Ground in Urban Tunneling by EPB Shield*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(11): 589-601, 2011. ISSN 1991-8178.
5. Klepsatel, F., Kusý, P. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Bratislava: JAGA, 2003. ISBN 80-77905-43-5.
6. Kolymbas, D. *Tunnelling and Tunnel Mechanics*. Springer, 2005. ISBN-10: 3-540-251960.
7. Leca, E., Domieux, L. *Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material*. *Geotechnique* 40, 1990. No. 4.

Přílohy

Příloha 1.: Tabulka směrné normové charakteristiky jemnozrnných zemin. Převzata z normy ČSN 73 1001.

Třída	Symbol	Charakteristika	Konzistence					
			Měkká	Tuhá	Pevná		Tvrdá	
			-	-	$S_r > 0,8$	$S_r < 0,8$	$S_r > 0,8$	$S_r < 0,8$
F1	MG	v, β, γ	$v=0,35; \beta=0,62; \gamma=19,0 \text{ kNm}^{-3}$					
		E_{def} MPa	5 ~ 10	10 ~ 20	12 ~ 21	15 ~ 30	Vyšetři se zkouškami	
		c_u kPa	40	70	70	70 ~ 80		
		φ_u °	0	0	10	12 ~ 15		
		c_{ef} kPa	8 ~ 16		8 ~ 16	12 ~ 16	16 ~ 24	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	26 ~ 30					
F2	CG	v, β, γ	$v=0,35; \beta=0,62; \gamma=19,5 \text{ kNm}^{-3}$					
		E_{def} MPa	4 ~ 8	7 ~ 15	10 ~ 12	18 ~ 25	Vyšetři se zkouškami	
		c_u kPa	30	60	60	60 ~ 70		
		φ_u °	0	0	10	12 ~ 15		
		c_{ef} kPa	6 ~ 14		10 ~ 18	18 ~ 36	18 ~ 26	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	24 ~ 30					
F3	MS	v, β, γ	$v=0,35; \beta=0,62; \gamma=18,0 \text{ kNm}^{-3}$					
		E_{def} MPa	3 ~ 6	5 ~ 8	8 ~ 12	12 ~ 15	Vyšetři se zkouškami	
		c_u kPa	30	60	60	60 ~ 70		
		φ_u °	0	0	10	12 ~ 15		
		c_{ef} kPa	8 ~ 16		12 ~ 20	20 ~ 40	20 ~ 28	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	24 ~ 29					
F4	CS	v, β, γ	$v=0,35; \beta=0,62; \gamma=18,5 \text{ kNm}^{-3}$					
		E_{def} MPa	2,5 ~ 4	4 ~ 6	5 ~ 8	8 ~ 12	Vyšetři se zkouškami	
		c_u kPa	30	50	70	70 ~ 80		
		φ_u °	0	0	5	8 ~ 14		
		c_{ef} kPa	10 ~ 18		14 ~ 22	22 ~ 44	22 ~ 30	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	22 ~ 27					
F5	ML MI	v, β, γ	$v=0,40; \beta=0,47; \gamma=20,0 \text{ kNm}^{-3}$				Vyšetři se zkouškami	
		E_{def} MPa	1,5 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 8	7 ~ 10	10 ~ 15	12 ~ 20
		c_u kPa	30	60	70	70 ~ 80	200	80 ~ 90
		φ_u °	0	0	5	8 ~ 14	0	15 ~ 20
		c_{ef} kPa	8 ~ 16		12 ~ 20	20 ~ 40	20 ~ 28	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	19 ~ 23					
F6	CL CI	v, β, γ	$v=0,40; \beta=0,47; \gamma=21,0 \text{ kNm}^{-3}$				Vyšetři se zkouškami	
		E_{def} MPa	1,5 ~ 3	3 ~ 6	6 ~ 8	8 ~ 12	10 ~ 15	12 ~ 20
		c_u kPa	25	50	80	80 ~ 90	170	80 ~ 90
		φ_u °	0	0	0	4 ~ 12	0	14 ~ 18
		c_{ef} kPa	8 ~ 16		12 ~ 20	20 ~ 40	20 ~ 28	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	17 ~ 21					
F7	MH MV ME	v, β, γ	$v=0,40; \beta=0,47; \gamma=21,0 \text{ kNm}^{-3}$				Vyšetři se zkouškami	
		E_{def} MPa	1 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 7	7 ~ 10	10 ~ 15	12 ~ 20
		c_u kPa	25	50	80	80 ~ 90	170	80 ~ 90
		φ_u °	0	0	0	4 ~ 12	0	14 ~ 18
		c_{ef} kPa	4 ~ 10		8 ~ 16	14 ~ 28	16 ~ 24	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	15 ~ 19					
F8	CH CV CE	v, β, γ	$v=0,42; \beta=0,37; \gamma=20,5 \text{ kNm}^{-3}$				Vyšetři se zkouškami	
		E_{def} MPa	1 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 6	6 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 15
		c_u kPa	20	40	80	80 ~ 90	150	80 ~ 90
		φ_u °	0	0	0	3 ~ 10	0	12 ~ 16
		c_{ef} kPa	2 ~ 8		6 ~ 14	14 ~ 28	14 ~ 22	Vyšetři se zkouškami
		φ_{ef} °	13 ~ 17					

